a M. Wiedmann
hommage de l'auteur
L. Foucault

Foucault

MÉMOIRE

SUR

LA CONSTRUCTION DES TÉLESCOPES

EN VERRE ARGENTÉ,

Par Léon FOUCAULT.

EXTRAIT DU TOME V DES ANNALES DE L'OBSERVATOIRE IMPÉRIAL DE PARIS.

PARIS,

MALLET-BACHELIER,

IMPRIMEUR-LIBRAIRE DE L'OBSERVATOIRE IMPÉRIAL DE PARIS,

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55.

—

1859

MÉMOIRE

SUR

LA CONSTRUCTION DES TÉLESCOPES EN VERRE ARGENTÉ,

PAR LÉON FOUCAULT.

EXTRAIT DU TOME V DES ANNALES DE L'OBSERVATOIRE IMPÉRIAL DE PARIS.

PARIS,
MALLET-BACHELIER,
IMPRIMEUR-LIBRAIRE DE L'OBSERVATOIRE IMPÉRIAL DE PARIS,
QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55.

1859

MÉMOIRE

SUR

LA CONSTRUCTION DES TÉLESCOPES EN VERRE ARGENTÉ,

Par Léon FOUCAULT.

On a souvent remis en discussion les qualités qui distinguent le télescope à réflexion et la lunette achromatique. En réalité, ces instruments ont, l'un et l'autre, rendu d'éclatants services à l'astronomie, et la science les a adoptés tous les deux. Aux télescopes de grande dimension tels que ceux que W. Herschel construisait de sa main, on demande une perception distincte et détaillée des objets célestes ; quant aux lunettes achromatiques, qui jamais n'atteignent les mêmes proportions, le degré de stabilité dont elles ont fait preuve les a plus spécialement rendues propres aux observations précises, aux déterminations de position. Les rôles étant ainsi partagés, le télescope à réflexion ne conserve son importance qu'à la condition de garder hautement la supériorité sous le rapport des effets optiques. En Angleterre, où la lutte a été vivement soutenue en faveur des instruments à réflexion, les grands miroirs métalliques sont restés en petit nombre, et les dépenses qu'ils ont occasionnées n'étaient pas de nature à encourager de nombreuses tentatives du même genre. Ajoutons que ces miroirs sont d'un poids tellement considérable, qu'on a toujours hésité à les transporter sur les hautes montagnes, seuls points du globe où il y ait chance d'utiliser toute la puissance des grands instruments. Dans cet état de choses, il nous a semblé que la substitution du verre au métal, dans la construction du miroir, apporterait au télescope une amélioration, pourvu qu'on parvînt à métalliser la surface après coup; or, à cet égard, l'argenture par voie humide, telle qu'on l'obtient par le

procédé Drayton, ne laisse rien à désirer. La solution, par son contact avec le verre, laisse déposer à froid une mince couche d'argent qui, une fois séchée, revêt un très-beau poli par le frottement d'une peau imprégnée d'oxyde de fer. Le 16 février 1857, l'Académie des Sciences a vu passer sous ses yeux un miroir de 10 centimètres obtenu de la sorte, et qui, monté en télescope newtonien, donnait de bonnes images et supportait un grossissement de 150 à 200 fois. Ce miroir existe encore avec son argenture primitive. Il a été conservé comme le premier spécimen qui ait été présenté à une société savante (1).

Après la présentation de ce premier télescope de 20 centimètres de diamètre et de 50 centimètres de longueur focale, nous en avons obtenu sans difficulté un second qui porte 22 centimètres de diamètre pour un foyer de $1^{m},50$. Puis abordant un diamètre de 42 centimètres, l'ouvrier, chargé de tailler le miroir, a échoué à cinq reprises différentes. Ce qui a bien forcé de reconnaître l'insuffisance des procédés ordinairement employés pour engendrer des surfaces moins grandes.

En présence d'un insuccès qui compromettait les espérances qu'on avait conçues au sujet des nouveaux miroirs , nous avons senti l'impérieuse nécessité d'étudier la figure des surfaces qui, bien que travaillées avec le plus grand soin, ne produisaient pas l'effet optique voulu ; de là sont sortis trois procédés d'examen qui s'appliquent directement aux surfaces réfléchissantes concaves et à l'aide desquels on reconnaît, avec le degré de précision requise, si ces surfaces sont plus ou moins correctement sphériques. Nous avons donc constaté que rarement les opticiens construisent des surfaces qui appartiennent à la sphère, et que ces surfaces en diffèrent d'autant plus qu'elles sont plus étendues. Nous avons pour ainsi dire mis le doigt sur une éminence centrale qui se reproduisait constamment dans le

---

(1) Dans la séance du 7 décembre 1857, l'Académie des Sciences a reçu une réclamation de M. Steinheil fondée sur un article de la *Gazette d'Augsbourg*, concernant l'ouverture de ses ateliers à Munich ; nous allons transcrire le passage où l'on mentionne les premiers essais de M. Steinheil :

« Eine für Astronomie interessante Novität bilden auch die neuen Teleskop-Spiegel von Glas. Durch Anwendung der Methode von Liebig Spiegelgläser zu versilbern, gelingt es so schöne Metallflächen aus Glas herzustellen dass auch die Rückseite der Versilberung einen vollkommenen Spiegel bildet, oder leicht durch Anwendung geeigneter Polirmittel dazu gemachtwerden kann. Wenn alsoein gewöhnliches Glas nur auf einer Seite mit genauer Gestalt sphärisch hohl geschliffen wird, so entsteht durch Versilberung derselben ein Teleskop-Spiegel, der, wenn er mit der Zeit auch anlaufen sollte, leicht durch einige Züge wieder herzustellen ist, da die genaue Gestalt durch das Glas erhalten wird. Wir haben durch ein Teleskop dieser Art gesehen, das 4 Zoll Oeffnung hat and bei hundert-maliger Vergrösserung ein wundervoll reines helles Bild Zeigte. So kann begreiflicherweise die Herstellung mächtiger Teleskope sehr leicht und wohlfeil werden. »

(*Allgemeine Zeitung*, n° 84. Lundi 24 mars 1856.)

travail du miroir de 42 centimètres, et cette constatation fut si claire et si manifeste, qu'elle a suggéré la pensée de retoucher localement la surface sans en altérer le poli. Cette tentative, peu encouragée par les hommes de l'art, a cependant parfaitement réussi, et de ce moment l'entreprise, débarrassée de toute entrave, a pris un nouvel essor.

En effet, dès qu'on eût acquis la preuve que la taille d'une bonne surface ne dépendait pas nécessairement d'un travail à exécuter d'emblée, dès qu'il fut démontré qu'on pouvait y revenir indéfiniment, le progrès n'était plus d'arriver précisément à la sphère, mais il consistait désormais à modifier par degrés les surfaces optiques pour les faire tendre vers la courbure parabolique, qui seule est capable de ramener en un foyer commun tous les rayons d'un faisceau parallèle. Les procédés d'examen optique qui d'abord avaient servi à reconnaître la sphéricité des surfaces, modifiés suivant la théorie des foyers conjugués et combinés avec la méthode des retouches locales, ont bientôt permis de conduire telle surface de révolution fournie par l'artiste depuis la sphère jusqu'au paraboloïde, en la faisant passer par tous les ellipsoïdes intermédiaires. Par ce moyen, les instruments, délivrés des aberrations qui compromettaient la netteté des images, ont pu être réduits à de moindres longueurs focales et grandir proportionnellement dans leurs trois dimensions.

Les proportions auxquelles on s'est définitivement arrêté assignent au télescope une longueur qui ne dépasse pas six fois le diamètre du miroir. Nous n'avons adopté ce rapport constant entre le diamètre et la distance focale, qu'après nous être assuré que la convergence exacte des rayons lumineux est la seule condition à remplir pour qu'un instrument donne tout son effet. La surface parabolique remplit cette condition expresse : c'est pourquoi elle communique au télescope une pénétration, ou, comme on dit, un *pouvoir optique*, qui, mesuré avec soin, s'est montré indépendant de la longueur focale et varie proportionnellement au diamètre du miroir. En ramenant à des règles précises la détermination de ces pouvoirs optiques dont l'appréciation était arbitraire, nous avons voulu fournir à ceux qui manient les instruments un moyen d'en apprécier directement la valeur; et de plus nous avons mis en évidence, dans tout instrument d'un diamètre donné, l'existence d'un pouvoir limite ou absolu, qui dépend de la constitution physique de la lumière et vient mettre forcément un terme à nos efforts.

Le télescope, débarrassé successivement du poids énorme de l'ancien miroir métallique et de l'excès de longueur imposé par l'emploi des surfaces sphériques, devenait de plus en plus facile à manier. Nous avons pensé y ajouter un complément utile en le montant parallactiquement sur un support construit en charpente légère.

En publiant ce Mémoire, nous nous proposons non-seulement de constater les résultats acquis, mais nous avons aussi l'intention de faire connaître les procédés pratiques qui ont servi à les obtenir. Sans vouloir abuser des détails, nous nous mettrons à la place de ceux qui auraient le désir de faire l'application de ces mêmes procédés et nous nous expliquerons de manière à les mettre à même de réussir. Telle est la mesure des développements dans lesquels nous croyons devoir entrer.

Nous aurons donc à décrire en premier lieu les divers procédés d'optique géométrique par lesquels on explore les surfaces sphériques concaves; puis nous ferons l'application générale des mêmes procédés à l'étude des surfaces ayant pour section méridienne une section conique, et nous démontrerons que ces procédés d'examen, appelés à se contrôler les uns les autres, sont plus que suffisants pour diriger le travail manuel par lequel on se propose de réaliser une surface proposée.

Passant alors à l'application des procédés, nous emprunterons aux arts les moyens de préparer les miroirs, d'agir sur les surfaces de verre, et de réaliser par des retouches locales une surface correcte. Nous énoncerons les caractères d'une surface parfaite et nous définirons les pouvoirs optiques.

Nous donnerons ensuite les détails pratiques pour métalliser, quelque grandes qu'elles soient, les surfaces du verre par le procédé Drayton, et nous indiquerons les précautions à prendre pour prévenir les déformations des miroirs et les adapter au tube du télescope; nous discuterons la composition des oculaires, et nous terminerons par la description d'un pied parallactique en charpente spécialement applicable aux télescopes à court foyer.

Examen optique des surfaces concaves; trois procédés différents. — Aberration positive et négative.

Quand un miroir ne donne pas de bonnes images, on se contente ordinairement de le rejeter sans chercher à reconnaître en quoi il pèche; on refait la surface à nouveau, et l'on répète le travail jusqu'à ce qu'on juge avoir réussi. Mais sur ce point bien souvent les avis diffèrent. Pourtant il existe des caractères auxquels on reconnaît si une surface réalise sensiblement la figure qui convient aux circonstances où elle doit fonctionner.

Supposons qu'on ait à vérifier un miroir sphérique concave. La propriété d'un pareil miroir est de renvoyer au centre de courbure et sans aberration aucune tous les rayons émanés de ce même centre. Autour de ce point et à très-petite distance sont distribués dans l'espace une infinité de foyers conjugués, qui jouissent sensiblement de la même immunité. Imaginons donc un point lumineux placé à

côté et tout près du centre de courbure : de l'autre côté se forme une image que l'on vient observer avec un microscope faible; si la surface est parfaite, la mise au point est bien définie, l'image est nette, entourée des anneaux de la diffraction, et les altérations qu'elle subit en deçà et au delà du foyer par la variation de la mise au point sont symétriques. Tels sont les caractères d'un foyer parfait formé par un cône de rayons qui se croisent tous au même lieu dans l'espace.

Si l'image manque de netteté, la mise au point, sans être aussi bien définie, produit cependant un maximum de condensation de lumière que l'on peut considérer comme le vrai foyer. Si alors l'image est ronde, on en conclut que la surface du miroir, sans être exactement sphérique, est du moins de révolution autour de son centre, et dès lors il est certain qu'en faisant varier la mise au point, on produira de part et d'autre du foyer des altérations dissemblables et complémentaires l'une de l'autre; des condensations et des raréfactions de lumière, distribuées en anneaux concentriques, apparaîtront disposées d'une manière réciproque, indiquant, dans les zones correspondantes de la surface réfléchissante, des variations du rayon de courbure dont une discussion indique aisément le sens.

En effet, quand on porte au-devant des rayons le microscope oculaire, et qu'on dépasse le foyer, on observe l'état du faisceau avant son point de convergence. Or, si ce point n'est pas unique pour toutes les zones concentriques, celles qui ont le foyer le plus court produisent, au niveau du plan d'observation, une condensation prématurée de lumière qui accuse un foyer plus proche; le contraire a lieu pour les zones qui ont le plus long foyer. Si maintenant on recule l'oculaire de manière à observer l'état des faisceaux après l'entre-croisement des rayons, on constate que les apparences deviennent inverses, tout en conduisant aux mêmes conclusions.

Généralement, dans les surfaces bien faites, les altérations de forme ne proviennent que d'un changement continu du rayon de courbure, qui varie d'une petite quantité et dans un même sens à partir du centre jusqu'au bord. Aussi les deux images qu'on observe symétriquement de part et d'autre du foyer, se présentent-elles habituellement comme des cercles, dont l'un offre une condensation de lumière vers le centre, et l'autre vers la circonférence.

Lorsque la surface à étudier n'est pas de révolution, on en est averti par la déformation des images qui cessent d'être rondes, et se partagent en concamérations d'intensités inégales.

Quand on en vient à l'expérience, on réalise le point lumineux qui sert d'origine aux rayons émis, en collant une lentille plan-convexe à court foyer sur l'une des deux surfaces égales d'un petit prisme rectangle à réflexion totale (*Pl. I, fig.* 1). Une flamme de lampe placée sur le côté, à quelques décimètres de la ligne d'expérience, éclaire par ses rayons horizontaux cette lentille qui se présente norma-

lement; les rayons convergents sont réfléchis totalement par la surface hypoténuse, et vont former, en dehors du prisme, une image de flamme que l'on fait tomber sur un écran opaque, percé en mince paroi d'une très-petite ouverture assimilable à un point.

Cette manière d'examiner les surfaces concaves suffirait à la rigueur pour en faire connaître les moindres imperfections; mais elle se recommande surtout dans les circonstances où il importe de s'assurer que la figure est de révolution. Cependant lorsqu'on se propose d'opérer des retouches, il est utile de recueillir des indications plus précises sur les variations du rayon de courbure : c'est le cas de recourir à un second procédé fondé sur un tout autre principe.

Dans une région voisine du centre de courbure, on dispose deux droites rapprochées, telles que les deux bords d'un fil métallique de 1 millimètre de diamètre; on éclaire cet objet par un miroir oblique, de telle sorte que, vu de tous les points de la surface du miroir objectif, il se projette sur un fond éclairé; l'image qui vient s'en former tout auprès, s'observe à l'œil nu, ou mieux au moyen d'une petite lunette réduite, par un diaphragme, à 1 millimètre et demi d'ouverture. Dans ces circonstances, l'objet apparaît dans l'étendue d'un disque éclairé dont l'étendue correspond à l'ouverture du miroir, et si les bords ne semblent pas rectilignes, les inflexions qu'ils présentent sont propres à caractériser les variations du rayon de courbure. Pour s'en rendre compte, il suffit de faire le tracé de la marche des rayons à partir de la surface du miroir jusqu'au plan focal de la lunette (*fig.* 2). On voit alors comment le petit diaphragme, en éliminant la majorité des rayons qui ont formé l'image directe i, a pour effet de composer l'image transmise i' avec des rayons réfléchis par différentes parties du miroir. Or, si le rayon de courbure varie d'une zone à l'autre, l'image i manquera de netteté, et l'image i' sera formée en chacun de ses points par des faisceaux partiels à foyers différents; elle se courbera dans l'espace, et les angles sous-tendus dans l'œil de l'observateur par les différentes parties de l'image ne seront pas proportionnels aux parties correspondantes de l'objet. En un mot, cette image paraîtra déformée, on y verra des contractions et des dilatations accusant une diminution ou une augmentation du rayon de courbure des éléments correspondants du miroir.

Si l'on veut inspecter d'un coup d'œil le miroir dans toute son étendue, il faut prendre pour objet un réseau régulier à mailles carrées, dont l'image devient très-sensible aux déformations, en quelque point qu'elles se manifestent. Supposons, ce qui arrive le plus souvent, que le miroir, exactement sphérique dans sa partie centrale, s'évase vers les bords par un allongement progressif du rayon de courbure. Soumis à l'épreuve du deuxième procédé, un pareil miroir donne une image dans laquelle toutes les lignes sont courbées comme dans la *fig.* 4, en

tournant leur concvité en dehors. Il en résulte que les mailles vont en croissant d'étendue du centre vers les bords, et varient dans le même sens que le rayon de courbure des éléments correspondants de la surface.

Une déformation inverse du miroir, qui consiste dans un relèvement trop rapide des bords, produit un renversement dans la courbure des lignes (*fig.* 5), d'où résulte que l'étendue des mailles diminue vers les bords du champ, et varie encore dans le même sens que le rayon de courbure. Enfin, il arrive fort souvent que les bords d'un miroir sont abaissés au-dessous du niveau sphérique, et qu'en même temps la surface présente une éminence centrale, limitée tout autour par une sorte de rigole circulaire. En pareil cas, le rayon de courbure varie successivement dans les deux sens du centre jusqu'au bord ; cette particularité se révèle encore très-clairement par les sinuosités des lignes observées (*fig.* 6), dont la disposition fait naître une variation analogue dans l'étendue des mailles qui résultent de leur entre-croisement. On a eu soin de mettre en regard dans la même planche les figures qui représentent les images observées et le profil énormément exagéré des surfaces déformées. Ce deuxième procédé fournit donc, sur la configuration des surfaces qu'on examine, des indications très-sûres et très-faciles à interpréter, mais il manque un peu de sensibilité, et, dans le cas où il laisse percevoir les lignes du réseau sensiblement droites (*fig.* 3), on n'est pas encore certain d'avoir obtenu une surface irréprochable et susceptible de résister à l'épreuve rigoureuse d'un troisième et dernier procédé.

On dispose, comme dans le cas du premier essai, un point lumineux au voisinage du centre de courbure de manière à ne pas masquer les rayons en retour; après s'être croisés, ces rayons forment un cône divergent dans lequel l'œil se place, pour ensuite se porter au-devant du foyer jusqu'à ce que la surface du miroir paraisse entièrement illuminée; puis, à l'aide d'un écran à bord rectiligne, on intercepte l'image jusqu'au point de la faire disparaître entièrement. Cette manœuvre produit pour l'œil qui observe une extinction progressive de l'éclat du miroir qui, dans le cas d'une sphéricité exacte, conserve jusqu'au dernier moment et dans toute l'étendue de sa surface une intensité uniforme. Dans le cas contraire, l'extinction n'a pas lieu simultanément sur tous les points, et du contraste des ombres et des lumières résulte pour l'observateur, avec un sentiment de relief exagéré, la perception en clair-obscur des proéminences et des dépressions qui portent atteinte à la figure sphérique. C'est là un effet résultant nécessairement de la marche des rayons qui convergent plus ou moins exactement vers un foyer commun.

Dans l'hypothèse d'une surface parfaite, l'image du point lumineux est un disque nettement terminé qui comprend tous les rayons réfléchis et qui, une fois

masqué par l'écran (*fig.* 7), ne laisse plus aucune lumière parvenir dans l'œil; mais pour peu que ce disque déborde sur l'écran, comme en chacun de ses points passent des rayons réfléchis par la surface entière, cette surface s'illumine plus ou moins et revêt pour l'observateur un éclat uniforme.

Supposons à présent la surface défectueuse : l'image du point, au lieu d'être nettement terminée, va s'entourer d'une auréole lumineuse formée par les rayons en aberration, et quand l'image proprement dite sera masquée par la présence de l'écran, ces rayons, passant outre, iront dans l'œil de l'observateur y dénoncer les éléments de la surface qui ne se présentent pas sous l'incidence voulue.

Dans la *fig.* 8, qui représente l'effet d'une surface à bords trop relevés, on voit clairement que l'écran interceptant le faisceau central qui forme image, laisse cependant passer les rayons venant du bord supérieur. Conséquemment, au moment de l'extinction progressive du faisceau central, ce bord supérieur paraîtra brillant et le bord opposé déjà noir, tandis que la région centrale et régulière présentera une teinte évanouissante uniforme.

Généralement, si la surface soumise à ce genre d'examen est altérée par des éminences et des dépressions distribuées d'une manière quelconque (*fig.* 9), tous les versants inclinés du côté de l'écran paraîtront noirs, et tous les versants inclinés du côté opposé paraîtront brillants. Donc en définitive l'aspect d'une telle surface sera le même que celui d'une surface mate qui présenterait, avec un degré d'exagération extrême, des saillies et des creux semblablement distribués, et qui serait éclairée par une lumière oblique provenant d'une source placée du côté *opposé* à l'écran qui intercepte l'image. Cette règle est importante à consulter si l'on tient à écarter toute incertitude dans l'interprétation des résultats observés, car souvent il arrive que, sous l'influence d'une disposition morale indépendante de la volonté, les creux et les reliefs semblent s'intervertir; mais, quelle que soit la sensation perçue, on est certain d'éviter l'erreur de signe, pourvu que l'on prenne garde à la position de l'écran et qu'on interprète en conséquence la disposition des ombres et des lumières.

Nous avons donc, en résumé, trois procédés à mettre en usage pour contrôler la configuration des surfaces réfléchissantes concaves. Le premier fondé sur l'observation microscopique de l'image d'un point lumineux : il s'applique particulièrement au cas où l'on veut reconnaître si la figure est de révolution. Le second, qui agit par élimination au moyen d'une lunette étroitement diaphragmée appliquée à l'observation de l'image d'un réseau à mailles carrées : il a surtout la propriété de faire connaître les variations du rayon de courbure aux différents points de la surface. Et le troisième, qui est le plus sensible de tous, et qui repose sur l'observation directe de la surface contemplée à l'œil nu par les rayons constitués en foyer et passant aux limites d'un écran opaque. Observer au microscope l'image d'un

point, étudier à la lunette diaphragmée les déformations du réseau, et regarder à l'œil nu la surface au moyen de rayons échappés à l'image interceptée, tels sont les artifices appelés, en se contrôlant mutuellement, à fournir tous les renseignements désirables sur la configuration des surfaces optiques.

Jusqu'à présent nous avons supposé que ces procédés s'appliquaient uniquement à l'examen des surfaces sphériques limitées dans leur application au cas où elles fonctionnent pour des foyers conjugués très-voisins du centre de courbure. Ces restrictions admises, la démonstration en est devenue plus facile et plus claire. Mais, considérés à un autre point de vue, ces procédés prennent un caractère de généralité qui vient en augmenter l'importance.

Faisant abstraction de la surface pour ne considérer que le faisceau réfléchi, les indications fournies par les procédés d'examen s'appliquent au faisceau lui-même, et les particularités qui ont été signalées comme des attributs d'une surface sphérique, deviennent à juste titre les propriétés réelles d'un faisceau lumineux exactement conique.

Or, comme dans les instruments d'optique la netteté des images dépend expressément de la convergence finale des rayons lumineux, ces instruments, quels qu'ils soient, tombent sous le contrôle des mêmes moyens d'épreuve.

Nous ne sommes donc plus assujettis à observer un miroir en son centre de courbure, et puisque le but proposé est de construire des télescopes pour observer des objets situés à l'infini, nous allons prendre le miroir concave tel qu'il sort des mains de l'artiste et le conduire, par une série de transformations, à la figure qu'il convient de lui donner pour le faire fonctionner utilement sur les corps célestes.

Ce miroir de verre, même sans être argenté, réfléchit assez de lumière pour qu'on puisse le soumettre à l'épreuve des trois procédés; on l'observe près du centre de courbure, et s'il est sphérique, l'image du point lumineux est ronde, nette et tranchée, les lignes du réseau sont droites et, revenant à l'image du point qu'on contemple par l'écran, on produit l'extinction simultanée sur toute la surface.

Ce fait constaté, on rapproche l'objet de la surface du miroir : nécessairement l'image s'éloigne et l'écartement qui survient entre les deux foyers conjugués exigerait, pour qu'il y eût encore convergence parfaite des rayons réfléchis, que la surface appartînt à un ellipsoïde de révolution. Or, comme elle est restée sphérique, les rayons émanés d'un point ne doivent plus se croiser en un seul point. On constate, en effet, par l'application des trois procédés, qu'il y a aberration, et dans un sens tel, que les différents éléments du miroir donnent leur foyer à plus courte distance à mesure qu'ils s'éloignent de la partie centrale. L'image du point lumineux examinée au microcope commence à s'entourer d'une auréole d'aberration; quand on change la mise au point, on voit cette image dégénérer de part et d'autre

du plan focal en deux images complémentaires, dont l'une, plus rapprochée du miroir, présente au pourtour une accumulation de lumière, et dont l'autre affecte la disposition inverse; les lignes du réseau commencent à se courber en tournant leur convexité à l'extérieur comme dans la *fig.* 5, et l'extinction de l'image par l'écran produit sur la surface du miroir une distribution inégale de lumière (*fig.* 13) qui semble accuser un centre bombé et des bords relevés, avec une rigole circulaire entre deux. A tous ces caractères on reconnaît que la surface du miroir n'est pas celle qui conviendrait à la position actuelle des foyers conjugués et qu'elle en diffère de telle sorte, que le rayon de courbure est relativement trop court et de plus en plus aux divers éléments à mesure qu'ils s'éloignent de la partie centrale. On voit déjà clairement indiquée la modification qu'il faudrait imprimer à cette surface pour la ramener à de meilleures conditions : évidemment il y aurait à la retoucher de manière à rétablir entre les rayons de courbure cette variation qui leur manque, et l'on verra plus loin qu'il y a une infinité de manières d'opérer cette retouche.

Poursuivons : c'est-à-dire rapprochons encore l'objet du miroir, et repoussons du même coup l'image à plus grande distance. L'aberration va croissant, ainsi que les phénomènes qui en décèlent la grandeur et le sens. En sorte qu'il devient manifeste que l'aberration pour une surface sphérique augmente avec la distance des foyers conjugués. Mais supposons que, partant du centre de courbure et avant de passer d'une station à une autre, on maîtrise les phénomènes d'aberration en exécutant les retouches conseillées par les indications des procédés d'examen, la figure du miroir, primitivement sphérique, sera graduellement modifiée par une série de retouches légères qui la feront successivement passer par la série des figures ellipsoïdales ayant le paraboloïde pour limite. Telle est la méthode qui a été suivie avec succès pour obtenir des miroirs à large ouverture donnant sans aberration sensible l'image des objets situés à l'infini.

Lorsqu'on a réussi à détruire toute aberration pour une situation particulière des foyers conjugués, et qu'on revient à l'une des positions précédemment occupées, on voit reparaître en sens inverse l'ensemble des phénomènes qui accusent une aberration dans le cône des rayons convergents. L'image du point lumineux entourée au foyer même d'une auréole lumineuse dégénère, quand on tire à soi le microscope oculaire, en un cercle cerné de lumière avec un centre plus ou moins obscur; les fils du réseau apparaissent courbés dans l'image en tournant leur concavité en dehors (*fig.* 4) et la surface, examinée quand on masque l'image, apparaît (*fig.* 14) avec un creux dans la partie centrale et des bords renversés en arrière. En un mot, tous les phénomènes deviennent inverses de ceux qu'on observe sur une surface sphérique éprouvée en dehors du centre de courbure.

Si l'on convient de considérer comme *positive* l'espèce d'aberration qui résulte le plus souvent de l'extension disproportionnée des surfaces sphériques, on désignera comme *négative* l'aberration de sens inverse qui provient d'une correction exagérée ou inopportune de l'aberration de sphéricité. Mais, pour ne considérer que l'ensemble du faisceau indépendamment de l'appareil chargé d'en opérer la convergence, on peut convenir d'exprimer par aberration positive la constitution d'un faisceau dont les parties centrales convergent les dernières, auquel cas la caustique (*fig.* 10) formée par la suite des rayons entre-croisés a son sommet tourné du côté vers lequel la lumière se dirige; tandis que par aberration négative on entendra désigner la constitution inverse d'un faisceau où les parties centrales convergent les premières : d'où résulte une caustique dont le sommet se tourne vers l'appareil convergent (*fig.* 11). A ces deux états du faisceau lumineux correspondent deux apparences contraires, et comme une même surface ellipsoïde peut donner de l'aberration positive ou négative, suivant qu'elle fonctionne pour des foyers situés en dedans ou en dehors des limites correspondantes à ses propres foyers, il en résulte qu'une même surface peut offrir au troisième procédé les deux aspects opposés. Pour s'en rendre compte, il importe de rechercher quel est le sens géométrique de la figure qui apparaît en pareille circonstance.

Et d'abord il faut bien remarquer que pourvu qu'une surface fonctionne de manière à renvoyer vers l'observateur un faisceau exempt d'aberration, cette surface, quelle qu'elle soit, examinée au troisième procédé, apparaît uniformément éclairée comme si elle était plane. Si donc surviennent des altérations de forme capables de troubler la convergence des rayons, l'aspect de la surface en sera modifié de telle sorte, qu'elle semble différer du plan comme la figure altérée diffère de la figure correcte. En d'autres termes, le relief du solide qui se montre en pareil cas, au lieu de révéler la véritable figure du miroir, fait connaître la figure du solide superposé à la surface correcte.

Supposons, par exemple, qu'une surface sphérique soit mise en observation dans des circonstances où elle devrait présenter la figure ellipsoïde. C'est dire qu'à la surface qui convient s (*fig.* 12) on substitue la surface s' qui ne convient pas. Pour avoir une idée de l'aspect qui devra s'ensuivre, rapportons le cercle et l'ellipse aux mêmes coordonnées, puis construisons la courbe donnée par la variation de la différence des ordonnées correspondantes aux mêmes abcisses. Cette courbe, qui est du 4ᵉ degré, est bien celle qui, supposée tournant autour de l'axe, engendrerait une surface conforme à celle qui se dessine en clair-obscur (*fig.* 13 ou 14) sur un miroir soumis au troisième procédé, lorsque ce miroir a pour section méridienne une section conique, et qu'il est éprouvé en dehors des conditions définies par la position de ses propres foyers. On comprend

d'ailleurs qu'il y ait dans cette figure interversion des creux et des reliefs, suivant que la surface réelle du miroir est intérieure ou extérieure à la surface théoriquement correspondante aux positions occupées dans l'espace par l'objet et l'image. Ainsi s'expliquent, dans leur variation progressive et continue, les divers aspects que présente un miroir ellipsoïde considéré à toutes les distances où peut se former l'image résultant du concours des rayons réfléchis.

Des trois procédés qui viennent d'être successivement décrits, un seul à la rigueur suffirait pour guider la main qui doit opérer les retouches et faire passer la surface du miroir par tous les ellipsoïdes qui conduisent à la figure limite du paraboloïde. Mais en les employant concurremment, on est plus assuré de se mettre en garde contre les fausses manœuvres. D'ailleurs ces divers procédés se complètent plutôt qu'ils ne se suppléent les uns les autres. L'expérience a montré bien des fois que, dès qu'ils s'accordent à désigner une surface sans défaut, l'effet optique atteint un degré de perfection qui ne laisse plus rien à désirer; on peut même sciemment laisser persister de légères ondulations qui s'accusent au troisième procédé, sans que l'effet optique en paraisse sensiblement altéré, ce qui semble indiquer que ce genre d'examen réalise, à l'égard des surfaces optiques, une sorte de réactif sensible à l'excès. La difficulté n'est donc plus de constater les imperfections du travail des surfaces, et, pour les rendre irréprochables, ce qui reste à faire, c'est d'attaquer la substance du verre par un agent approprié aux minimes quantités qu'il s'agit de soustraire.

Détails pratiques sur la taille des miroirs en verre, et sur l'exécution des retouches locales.

Quand le miroir de verre n'atteint pas de grandes dimensions, quand son diamètre ne dépasse pas une vingtaine de centimètres, le travail de la surface ne présente pour ainsi dire aucune difficulté, et l'on peut s'en tenir aux procédés en usage dans les bons ateliers d'optique. On commence par préparer une paire de bassins en cuivre un peu plus grands que le verre, on leur donne au tour la courbure voulue, et on les réunit, *balle et bassin*, en les frottant l'un sur l'autre avec de l'émeri de plus en plus fin. Le verre étant mis d'épaisseur, dégrossi et débordé, on le rode à l'émeri et à l'eau sur la partie convexe ou balle, jusqu'à ce que la surface ait pris un douci très-fin et bien uniforme. Ensuite on colle sur ladite balle une feuille de papier que l'on imprègne de rouge d'Angleterre, et, par le frottement prolongé sur ce polissoir, on éclaircit la surface du verre qui finit, avec le temps, par prendre un poli parfait. En opérant ainsi, une main habile obtient ordinairement une surface de révolution qui ne coïncide pas exactement avec la sphère, mais qui en diffère dans le sens favorable à la correction de

l'aberration de sphéricité. Aussi un pareil miroir comporte-t-il souvent une ouverture plus grande que celle qui correspond à la figure rigoureusement sphérique. Mais quand on aborde de plus grands diamètres, on ne peut plus compter sur l'exactitude de cette correction empirique, et il devient nécessaire de recourir à des retouches locales. De plus le prix des bassins augmente dans une proportion très-rapide; leur poids devient considérable, et l'adhérence qui va croissant entre le verre et le métal, rend le travail plus pénible et diminue les chances de succès. Pour ces divers motifs, nous avons renoncé à l'emploi des bassins en métal, et nous en sommes revenu à travailler les miroirs verre sur verre. Dès lors les frais d'établissement ne consistent plus que dans l'acquisition de deux disques en verre de forme et de grandeur appropriées à celles que l'on veut conserver à la pièce.

S'agit-il, par exemple, de construire un miroir de 40 à 50 centimètres, on commence par se procurer, en les coulant dans un moule en fonte, deux disques de verre épais bien recuits, et terminés chacun par un revers convexe. Par un premier travail de dégrossissage opéré mécaniquement, on amène approximativement les deux surfaces principales à la courbure voulue, on déborde circulairement les deux disques en laissant un excès de diamètre à celui qui doit jouer le rôle de balle, on polit le revers de l'autre disque, et sur le pourtour de chacun d'eux on creuse une gorge destinée à recevoir des cordages pour faciliter les manœuvres.

Les deux pièces ainsi préparées, balle et miroir, sont dirigées vers l'atelier des opticiens et confiées à une main habile, afin d'y être travaillées l'une par l'autre avec tous les soins nécessaires pour engendrer une surface de révolution.

L'opération s'exécute sur un *poste* solidement établi, sorte de pilier isolé de toute part et qui porte en son centre un pas de vis sur lequel se montent les molettes qu'on fixe à la poix au revers de l'un et de l'autre disque; verticalement au-dessus de ce centre à vis, on fixe au plafond un fort piton où s'accroche un ressort en hélice capable de supporter le poids du miroir. Enfin, pour donner prise à la main qui doit imprimer le mouvement, un appendice circulaire à rebord saillant et volumineux se monte à vis sur la molette et offre au besoin en son centre un point d'attache au cordage plus ou moins tendu qui, d'autre part, s'unit au ressort de suspension.

La balle en verre étant fixée sur le poste, on étend à la surface un émeri un peu grossier délayé avec de l'eau; on dépose avec précaution le miroir par-dessus et l'on use les deux pièces l'une sur l'autre, en ayant soin de varier les mouvements de manière à distribuer également l'action dans tous les sens. En même temps qu'il tourne autour du poste, l'ouvrier fait circuler sous la main le rebord de la molette, de manière à occuper avec la balle et le miroir des positions relatives constamment changeantes. Peu à peu l'émeri s'écrase, et pour éviter qu'il ne se

dessèche, on l'humecte à tout instant d'eau projetée en gouttelettes sur les parties qui se découvrent tour à tour. Mais à mesure que le travail se prolonge, l'émeri perd son mordant, et parce qu'il devient de plus en plus fin, et parce qu'il s'encombre de parcelles détachées de l'une et de l'autre surface ; au bout d'un certain temps l'ouvrier reconnaît qu'il convient de relever la pièce, d'éponger les deux parties et de renouveler l'émeri.

Il y a un certain art à bien conduire, comme on dit, un émeri de manière à le distribuer uniformément entre les surfaces et à le garder convenablement mouillé pendant un temps suffisant pour qu'il produise tout son effet; entre des mains inhabiles, l'émeri ne s'étend pas bien, ne se lie pas convenablement et s'échappe sans avoir exercé toute son action. On passe alors son temps en fausses manœuvres, on consomme inutilement des poudres, et le travail n'avance pas.

Les premiers émeris sont destinés à produire la coaptation des surfaces ; on reconnaît que ce résultat est obtenu à ce que les parties se meuvent indifféremment l'une sur l'autre dans toutes les directions. On emploie alors les émeris de plus en plus fins, qu'on désigne dans le commerce par le temps ou le nombre de minutes qui en opère la séparation quand on les traite par lévigation dans l'eau. En se succédant entre les surfaces frottantes, ces émeris, à une, à deux. . . . ., à quarante, à soixante minutes, communiquent au douci un grain uniforme et velouté dont la finesse se révèle par un ton opalin et demi-transparent.

Si l'on tient à obtenir une surface d'un rayon déterminé, il est prudent, pendant cette longue succession des différents émeris, de consulter de temps en temps le sphéromètre, car dans le cas où il serait indiqué d'augmenter le rayon de courbure, il n'y aurait qu'à fixer le miroir sur le poste et à continuer le travail avec la balle en dessus; dans le cas contraire, il faudrait laisser les choses dans les conditions premières et faire dépasser le miroir en lui imprimant des mouvements étendus. Ces deux manières d'agir sur le rayon de courbure ont une grande efficacité, surtout quand on travaille verre sur verre. On s'en rend compte aisément en considérant qu'aussitôt que les pièces dépassent l'une sur l'autre, la partie qui surplombe presse par son milieu sur le bord de l'autre; d'où il suit que l'usure, au lieu de se distribuer uniformément, porte en majeure partie sur le pourtour de la pièce inférieure et sur le milieu de la pièce supérieure. Il n'en faut pas davantage pour expliquer comment cette inégale répartition de pression et d'usure tend à augmenter la courbure, dans le cas où la partie concave est en-dessus, et à la diminuer lorsqu'on agit dans la position inverse. Quand on sait tenir compte de cette influence, non-seulement on n'a plus à en redouter les effets, mais encore on en tire parti pour maintenir la surface à son degré de courbure jusqu'au moment de commencer le poli.

Le douci étant amené au plus haut degré de finesse et d'uniformité, il s'agit de

le transformer en un poli parfait. On connaît plusieurs procédés pour polir le verre; celui qui a paru le mieux convenir au travail des miroirs est le polissage au papier et au rouge d'Angleterre. Sur la surface même du disque qui a servi à doucir le miroir, on colle à l'empois une feuille de papier dont la trame paraisse aussi égale que possible; au moyen d'une sorte de ménisque en verre appelé *colloir*, on chasse l'excès d'empois vers les bords, et on applique intimement le papier sur le verre; puis, en l'attaquant légèrement par le frottement d'une éponge humide, on détache des parcelles, on *dégarnit* ce papier de manière à soulever une peluche qui, une fois séchée, retient utilement les poudres à polir. Il faut encore passer la pierre ponce, la chasser ensuite avec la brosse, après quoi on étend le rouge d'Angleterre avec un chiffon de papier froissé, et le polissoir est prêt.

Le miroir, lavé et séché, est déposé sur ce polissoir, qui le touche de toute part et qui va l'éclaircir aux premiers frottements; mais avant de mettre la pièce en mouvement, il est indispensable de supporter une partie de son poids en la rattachant au ressort de suspension, au moyen d'une corde suffisamment tendue. A cette disposition on gagne déjà l'avantage de mouvoir sans effort une assez forte masse. Mais ce qui est plus important, c'est qu'en diminuant la pression sur le polissoir on ralentit le dégagement de la chaleur due au frottement, et l'on évite dans une certaine mesure les déformations qui en résultent. Si au contraire on néglige cette précaution, la chaleur qui provient d'un frottement énergique fait bomber les deux pièces, qui bientôt se quittent vers les bords et ne se touchent plus que par le milieu. Le miroir *pivote* sur son centre, la partie moyenne seule se polit, la surface se creuse, et les bords restent mats. Mais, par l'emploi du ressort, on rétablit l'égalité d'action, et tout en prolongeant la durée du polissage, on n'est que plus assuré d'obtenir un bon résultat.

Quand le miroir paraît entièrement poli, on le démonte, on le soumet à un premier examen, et si la surface ne présente pas d'imperfection grave, on entreprend de l'amener par une série de retouches locales à la figure définitive qui doit en faire un miroir objectif parfait.

Pour exécuter convenablement cette délicate opération, il est nécessaire de disposer d'un local fermé où l'on puisse établir une ligne d'expérience quatre ou cinq fois plus longue que la distance focale principale du miroir. A l'une des extrémités, on place le miroir monté dans un cadre qui s'adapte au tube du télescope. Ce tube, débarrassé du prisme et des oculaires, est porté sur deux tréteaux qui le maintiennent dans une position horizontale et l'élèvent à une hauteur commode pour les observations. Des tables occupées par les objets nécessaires à l'examen des surfaces se meuvent dans toute l'étendue de la ligne. De plus, sur un bâti isolé comme un poste d'opticien, on dispose, pour recevoir le

3.

miroir, un bassin en bois dont la courbure s'adapte au revers de la pièce. Enfin on prépare, pour effectuer les retouches, une série de polissoirs dont le diamètre varie du cinquième au tiers de celui de la pièce à retoucher. Ces polissoirs sont en verre recouvert de papier et montés sur molettes en bois ou en liége. On s'en sert pour attaquer le miroir et pour exercer dans des points déterminés une usure de la même nature que celle qui a engendré le poli général de la surface. Mais, pour que cette soustraction de matière s'opère sans rompre la continuité de la courbure, en d'autres termes, pour que les retouches se fondent sans solution de continuité et sans ligne de démarcation perceptible avec la surface primitive, il est indispensable d'apporter le plus grand soin à la préparation des polissoirs. Aussi croyons-nous utile d'aborder les détails pratiques et de donner à ce sujet les renseignements les plus précis.

Dès les premiers essais, on a reconnu que la meilleure courbure à donner au polissoir pour exécuter des retouches partielles n'est pas celle qui coïncide exactement avec la courbure du miroir : le mieux est de lui assurer un léger excès de convexité, parce qu'alors le contact a lieu au centre; par suite, la retouche s'adresse plus directement à l'élément auquel on la destine, et elle se fond dans la surface de part et d'autre du point de contact par une transition insensible. Cependant il ne faudrait pas exagérer cet excès de courbure, car le contact se restreindrait à une étendue qui ne serait plus en rapport avec celle du polissoir. Enfin, lors même que le polissoir aurait la courbure voulue, il importe encore de surveiller attentivement l'état du papier qui sert de véhicule aux poudres polissantes, car parfois il arrive que ces poudres voyagent et qu'en se déplaçant elles décentrent le point d'attaque de manière à dérouter l'opérateur et à fausser la retouche. Il y a donc un ensemble de conditions délicates à remplir. Mais l'art des opticiens offre des ressources qui permettent de surmonter toutes les difficultés.

Quand on veut préparer un polissoir et lui communiquer la courbure précise qui convient au travail de retouche, la marche à suivre consiste à le marier avec une contre-partie en verre de même diamètre et de courbure inverse : on a ainsi, d'après les expressions reçues, une balle et un bassin que l'on rode l'un sur l'autre avec le soin qu'on apporterait à l'exécution d'une bonne surface. Ces disques une fois *réunis*, il faut en vérifier la courbure. Pour cela on pose la partie concave ou bassin sur la grande balle qui a servi au travail du miroir et dont la surface est restée dépolie, et par un frottement développé sur place on fait apparaître une trace blanchâtre qui décèle la répartition des points de contact. Pour que le polissoir qui est convexe arrive à toucher le miroir par son centre, il est clair qu'il faut que le petit bassin touche la grande balle par le bord et y laisse par le frottement une trace annulaire. Tant que ce résultat n'a pas été obtenu, on

continue de modifier par un rodage réciproque la courbure des deux pièces, en ayant soin de tenir le bassin dessus ou dessous, suivant qu'il faut augmenter ou diminuer la courbure; puis enfin, lorsque l'épreuve du frottement sur le dépoli de la grande balle donne une trace annulaire qui va en mourant jusqu'au milieu de la distance au centre, on est sûr que les deux disques ont la courbure voulue, et l'on peut s'occuper de coller les papiers.

A la rigueur il suffirait de garnir le polissoir; mais, de même que les deux pièces ont servi à se régulariser l'une par l'autre en les rodant verre sur verre, de même une fois garnies toutes deux on perfectionne les papiers en les soumettant à un traitement analogue. On colle ces papiers à l'empois dont l'excès s'échappe sous l'action du colloir; on promène à la surface une éponge mouillée en ayant soin d'attaquer légèrement l'espèce d'épiderme formé par l'encollage primitif, et on laisse sécher. Quand l'humidité s'est dissipée, on trouve le papier bien tendu, mais il est comme rugueux et chargé de parcelles roulées en globules qui ont été détachées par l'éponge; on les enlève par le frottement d'une ponce plate et on les chasse avec la brosse. En cet état on pourrait considérer le polissoir comme prêt à entrer en action; cependant, comme le papier peut présenter des inégalités d'épaisseur, nous lui faisons subir une dernière préparation qui a aussi pour effet de soulever un velouté très-propre à fixer et à retenir les poudres. Cette préparation consiste à réunir les deux papiers, à les attaquer l'un par l'autre avec de la ponce pulvérisée et mouillée d'un liquide qui ne décolle pas l'empois. On fixe donc le polissoir sur l'établi, on l'arrose de benzine, on le saupoudre de ponce pilée, on dépose le bassin par-dessus, et l'on agit pendant un certain temps comme si l'on voulait doucir une surface. Peu à peu la benzine s'évapore, la ponce qui formait bouillie redevient pulvérente, et quand on sent qu'elle a une tendance à se réunir en tas, on l'écarte, et on recommence ainsi deux ou trois fois. On donne pour finir un coup de brosse que l'on prolonge avec insistance, et l'on voit le papier recouvrer sa blancheur. Mais si on l'examine avec attention, on reconnaît que la surface s'est avantageusement modifiée en se recouvrant d'un velouté uniforme dont la présence favorise toujours l'action du polissoir.

A la manière dont s'étalent et se fixent soit le rouge, soit le tripoli qu'on ajoute pour donner du mordant, on constate déjà que le traitement à la ponce et à la benzine réalise des conditions d'uniformité qui rarement se rencontrent dans la feuille de papier employée telle quelle. Mais lorsque le travail se prolonge, lorsqu'un polissoir a servi pendant plusieurs heures, on le voit se comporter bien différemment suivant qu'il a subi ou non cette dernière préparation. Quand on omet de réunir les papiers, l'opération marche bien, il est vrai, pendant un certain temps; mais bientôt dans la partie centrale où s'exercent les plus fortes pressions, le papier se tasse, perd

sa porosité et se dépouille de son duvet; il se lisse et ne retient plus les poudres, qui se réfugient vers les bords. En pareil cas, malgré l'excès de courbure du polissoir, l'attaque n'a plus lieu par le centre, ce sont les bords qui mordent; en sorte qu'au lieu de pratiquer des retouches qui se fondent insensiblement les unes dans les autres, on court le risque de tracer des sillons plus ou moins profonds et toujours difficiles à réparer. Si au contraire on a pris soin de roder le polissoir suivant le procédé décrit, comme cette opération met à nu les parties profondes et spongieuses du papier, les poudres s'y logent et s'y fixent d'une manière plus durable, en sorte que la partie centrale garde beaucoup plus longtemps son efficacité. On ne voit pas cette région se lisser, se dégarnir comme dans le premier cas, et l'on ne risque pas de faire de fausses retouches par suite de l'affaissement des parties centrales du polissoir et de la prédominance fâcheuse des bords.

Étant ainsi pourvu de deux ou trois polissoirs de grandeurs différentes et bien adaptés à la courbure moyenne du miroir, rien n'empêche d'entreprendre le travail de retouche. Des trois procédés d'examen qui ont été décrits, deux suffisent à diriger l'opération, le premier et le dernier: c'est-à-dire l'observation microscopique de l'image et la vision directe de la surface par les rayons déviés de l'image interceptée. Ce qui détermine le choix de ces deux procédés, c'est que l'objet lumineux est le même pour tous deux et que, pour passer de l'un à l'autre, il suffit d'échanger le microscope pour l'écran.

Par un premier examen au voisinage du centre de courbure, on explore la surface, et suivant qu'elle réclame une retouche plus ou moins locale, on détermine la grandeur du polissoir qu'il convient d'employer. Puis on dépose le miroir sur son bassin en bois tapissé d'une étoffe de laine, et l'on procède à la mise en train.

Généralement toute surface qui a séjourné un certain temps au contact de l'air se montre rebelle à l'action du polissoir, si on ne prend soin de la nettoyer de manière à lui communiquer un état d'homogénéité parfaite. On la saupoudre de blanc d'Espagne, on y verse un peu d'eau, et au moyen d'un tampon de coton on en forme une pâte qu'on étend uniformément et qu'on laisse sécher. On saisit ensuite un nouveau tampon léger, bouffant, peu serré, dont on effleure seulement la surface; le blanc peu adhérent se détache, s'échappe au dehors et laisse apparaître le verre uniformément recouvert d'un voile transparent; en continuant de frotter légèrement avec du coton constamment renouvelé, on voit ce voile se dissiper peu à peu et la surface du verre finit par se montrer nette et pure. Toutefois sur une surface préparée de la sorte le polissoir glisse tout d'abord et ne finit par mordre qu'après avoir repassé plusieurs fois sur les mêmes parties. Les points où il commence à prendre se distribuent çà et là, irrégulièrement, par plaques où les poudres s'attachent et où l'on sent naître l'adhérence qui décèle un travail. Ces

plaques grandissent peu à peu; mais tant qu'elles ne sont pas devenues confluentes, l'action du polissoir manque d'uniformité, et il y aurait danger d'altérer la surface si l'on se servait du rouge qui a beaucoup de mordant; il est préférable d'employer, pour commencer, le tripoli de Venise qui s'étend bien sur le papier, qui attaque le verre moins vivement et qui semble avoir qualité pour la mise en train.

Lorsque le polissoir s'applique également bien sur tous les points, lorsque son adhérence est la même partout, on peut remplacer le tripoli par le rouge d'Angleterre, et désormais le travail commence. C'est le moment de chercher d'après l'examen optique des surfaces à se représenter la figure du solide de révolution qui est comme superposé au miroir et en altère la figure, puis il faut se demander quel est le mouvement à donner qui, étant répété un grand nombre de fois, en tournant autour du centre, sera capable d'enlever par usure le solide en excès. Ce mouvement, quel qu'il soit, une fois adopté, devra être exécuté sans changement tel qu'on en a décidé, pendant un certain temps, dix minutes, un quart d'heure, après quoi le miroir sera de nouveau examiné.

Sans doute il pourra arriver qu'on ait mal jugé et que le mouvement exécuté donne un résultat autre que celui qu'on attendait; mais au moins l'épreuve portera un enseignement, tandis que si on variait la manœuvre plusieurs fois entre deux examens, le résultat observé ne conduirait à aucune conclusion précise. Du reste, quand les polissoirs sont bien préparés, qu'ils touchent par le milieu et non par les bords, que le papier ne se glace pas et conserve son velouté, que les poudres ne voyagent pas, il n'y a pas à craindre que les résultats soient en discordance manifeste avec les manœuvres qu'on a exécutées. Le polissoir mené successivement suivant tous les diamètres produira à coup sûr une creusure centrale; mais si on le dirige suivant une série de cordes égales, on ne manquera pas de creuser une rigole annulaire qui s'éloignera du centre à mesure qu'on agira suivant des cordes plus petites, et la largeur de la zone attaquée variera avec l'étendue de la partie frottante et avec l'excès de sa courbure sur celle du miroir. Le mouvement de polissage dirigé suivant toute corde suffit donc déjà pour attaquer tous les points de la surface; mais, afin d'arriver à croiser les traits, on a encore la ressource de tracer des ellipses tournantes plus ou moins allongées, plus ou moins dilatées : seulement il ne faut pas négliger de surveiller l'état du polissoir, de circuler d'un pas uniforme autour de la pièce et de contrôler par un examen fréquemment répété l'effet produit par chaque espèce de retouche. On arrivera ainsi à rendre d'abord la surface sphérique, c'est-à-dire à obtenir au voisinage du centre de courbure une image nette du point lumineux et à produire l'extinction simultanée du faisceau en interceptant cette image par le bord de l'écran opaque.

Une fois réalisé, ce premier résultat, qui déjà témoigne de l'efficacité des re-

touches, prépare la voie au travail qui doit suivre et qui a pour objet de parvenir au paraboloïde de révolution en passant par les ellipsoïdes intermédiaires. Le point lumineux qui était placé au centre de courbure étant rapproché du miroir, le foyer se déplace en sens inverse, et l'examen optique, qui tout à l'heure accusait une surface parfaite, décèle dans cette nouvelle position un commencement d'aberration de sphéricité, l'image s'entoure d'une nébulosité légère, qui disparaît quand on force la mise au point du côté du miroir, et qui s'exagère dans le cas contraire; c'est le caractère de l'aberration positive. En effet, l'écran qui s'avance pour intercepter l'image communique à la surface l'aspect déjà signalé (*fig.* 13). On croit y voir une éminence centrale séparée du bord par une creusure annulaire; mais en variant tant soit peu la distance de l'écran au miroir, on détermine dans l'aspect stéréoscopique de cette surface des changements par suite desquels le fond de la gorge annulaire semble s'approcher plus ou moins du centre de figure. L'interprétation rationnelle de ce phénomène conduit à reconnaître qu'il existe une infinité de manières de retoucher le miroir pour effacer l'aberration : cela revient à dire qu'entre l'ellipsoïde osculateur au centre (*fig.* 15) et l'ellipsoïde tangent au bord de la surface sphérique (*fig.* 17), il existe une infinité d'ellipsoïdes qui ont avec la surface réelle un cercle de contact (*fig.* 16) dont le diamètre peut prendre toute longueur moindre que le diamètre du miroir.

Parmi ces surfaces, vers laquelle faut-il tendre? Cela dépend des dimensions du miroir. Quand son diamètre ne dépasse pas 25 à 30 centimètres, il y a intérêt à adopter la retouche la plus facile à exécuter; or c'est évidemment celle qui, respectant le bord, s'exerce particulièrement sur la partie centrale; mais quand le miroir prend des dimensions plus grandes, il vaut mieux se laisser guider par une autre considération et rechercher le système de retouche qui conduit à enlever le minimum de matière : on est ainsi conduit à partager la retouche entre le bord et le centre et à réserver, conformément à l'indication de la *fig.* 16, la zone qui correspond au cercle de contact. De toutes manières on arrive à opérer le nivellement apparent de la surface et à détruire du même coup l'aberration qui entourait l'image du point lumineux.

Ce résultat constaté, on répète la même opération pour une position plus avancée des foyers conjugués et, par suite, le miroir se modifie en prenant une forme ellipsoïde de plus en plus prononcée. Passant ainsi de station en station, les deux foyers cheminent en sens opposés, et ils indiquent, en s'écartant l'un de l'autre, que l'ellipsoïde subit un allongement correspondant.

Enfin l'image du point, repoussée de proche en proche et toujours maintenue exempte d'aberration, se trouve portée à l'extrémité de la ligne d'expérience. Il s'agit maintenant, par une dernière retouche, de la rejeter toute corrigée à l'infini. Plus la ligne d'expérience sera longue, moins cette dernière phase du tra-

vail semblera hasardeuse; cependant il faut savoir se maintenir dans les limites pratiques. Nous avons supposé que, dans l'emplacement où l'on opère, la distance des deux stations extrêmes est au plus égale à cinq fois la longueur focale du miroir; conservons ces données, et montrons que la dernière retouche peut encore être soumise à un contrôle rigoureux.

Lorsque l'image du point lumineux est reléguée à l'extrémité de la ligne, le point lui-même est encore à une certaine distance du foyer principal, et comme ce dernier est à moitié chemin du centre de courbure, sa position est déterminée. Nommons f le point correspondant au foyer principal, f' la position actuelle du point lumineux, et f'' une de ses positions antérieures, avec la condition de prendre $f'f''$ égal à ff'. En vertu des principes précédemment exposés sur la marche des aberrations positive et négative, il arrivera que si l'on ramène le point lumineux en f'', les apparences seront sensiblement conformes à celles qui devront se montrer lorsque le miroir sera rendu parabolique, et que le point lumineux sera maintenu en f'. Étudions donc le relief de la figure qui se produit alors, puis, ramenant le point lumineux en f', appliquons-nous à reproduire ce relief en modifiant la surface par une dernière retouche. Par ce moyen, on arrive à rejeter sans aberration l'image à l'infini, et à communiquer au miroir une figure voisine du paraboloïde de révolution. Mais s'il est impraticable d'aller observer l'image à l'infini où on l'a repoussée, rien n'est plus aisé, en intervertissant l'image et l'objet, que d'obtenir la vérification du résultat obtenu. On n'a qu'à prendre pour point de mire un objet extérieur situé à une distance aussi grande qu'on voudra, et à l'observer au moyen du miroir monté en télescope newtonien. L'image doit se montrer exempte d'aberration, et présenter des traces de diffractions aux contours de l'objet. Si cet objet est un point lumineux ou s'il affecte l'apparence du réseau à maille carrée, les trois procédés deviennent applicables au foyer principal, et pour peu qu'un défaut perceptible eût échappé à la dernièrere touche, il serait toujours temps d'y revenir et de le faire disparaître.

En résumé, la méthode que nous venons de décrire consiste à soumettre les surfaces à des épreuves optiques, et à les modifier par des retouches faites à la main jusqu'à ce qu'elles se montrent sans défaut. La nature des choses, avec laquelle il faut toujours compter, a permis d'instituer, d'une part, des procédés d'examen et, d'autre part, de recourir à des moyens d'attaquer la substance du verre, qui, sous le rapport de la précision, fussent les uns et les autres au niveau du résultat qu'il fallait obtenir. Si, contrairement à ce que l'expérience a pleinement démontré, les procédés d'examen manquaient de sensibilité, ou si les moyens d'attaque étaient moins délicats, la méthode eût échoué; aussi n'osons-nous affirmer qu'elle soit applicable aux miroirs métalliques, car il n'est pas démontré que l'alliage cristallin dont on les a formés jusqu'ici soit susceptible de supporter in-

définiment comme le verre l'action du polissoir. Mais lors même qu'on échouerait en essayant d'étendre aux miroirs métalliques le bénéfice des retouches locales, il n'y aurait pas à le regretter sérieusement, car l'opération venant à réussir, on n'en tirerait qu'un résultat précaire, et qui se trouverait compromis dès l'instant où le poli s'altérerait sous l'influence des agents atmosphériques. Sur le verre, au contraire, la courbure une fois réalisée peut être considérée comme acquise d'une manière définitive, attendu que les altérations qui surviennent avec le temps n'intéressent que la couche métallique déposée après coup par une opération que rien n'empêche de renouveler indéfiniment.

Définition et détermination numérique des pouvoirs optiques.

La méthode que nous venons de décrire et dont l'application a été répétée un grand nombre de fois a pour effet constant de porter les surfaces optiques à un degré de perfection qu'on atteint assez rapidement, et qu'on ne peut bientôt plus dépasser. Quand on est arrivé à ce point, il y a lieu de se demander si l'impossibilité de progresser encore tient à l'imperfection des procédés, ou si elle provient de ce qu'on a touché le but en réalisant une surface parfaite. Pour nous la question n'est pas douteuse, et nous n'hésitons pas à considérer comme parfaite une surface qui agit sensiblement sur la lumière comme le ferait un miroir rigoureusement conforme à la figure désignée par la théorie.

Lorsqu'une surface approche de ce degré de perfection relative, on voit survenir un ensemble de caractères qui, une fois appréciés, servent de guide à l'opérateur et l'avertissent du moment où il doit considérer son travail comme terminé. En même temps que s'effacent les défauts trahis par les divers procédés d'examen, l'image fournie par une telle surface prend au microscope un aspect particulier qui flatte l'œil, et qui ne se dément pas lors même qu'on y applique des grossissements exagérés. Cet aspect remarquable provient de ce que l'image est alors formée par le groupement d'éléments correctement circulaires. Chacun de ces disques élémentaires est à la vérité entouré d'un certain nombre d'anneaux ; mais, comme ces derniers n'ont qu'une intensité rapidement décroissante, le disque central conserve une supériorité d'éclat qui lui assure la prépondérance dans le tracé précis des contours. Des divers anneaux qui entourent ce disque on n'aperçoit ordinairement que le premier, et comme un intervalle obscur les sépare, il en résulte que ce premier anneau n'apporte dans l'image aucune confusion sensible, et qu'en se superposant à lui-même il se borne à dessiner un pâle cordon qui circule parallèlement aux contours les plus accentués de l'image. La théorie de la diffraction explique ce phénomène, qui dénote que tous les rayons du cône convergent arrivent au sommet dans un

accord de vibration à peu près complet. Si à la surface approximative obtenue par la méthode expérimentale on pouvait substituer une surface rigoureusement exacte, les rayons arriveraient au sommet du cône en concordance parfaite, mais le point lumineux ou plutôt le disque étroit formé par leurs concours n'en serait pas moins entouré d'anneaux. Il n'y a donc pas d'intérêt pratique à pousser la perfection des surfaces au delà du degré nécessaire à l'apparition des phénomènes caractéristiques de la diffraction. Lorsque ces phénomènes se montrent au foyer d'une manière évidente, c'est-à-dire lorsque l'image d'un point formée à miroir entièrement découvert apparaît sous la forme d'un disque entouré d'anneaux circulaires d'une intensité rapidement décroissante, on peut être assuré qu'un pareil miroir, dirigé sur toute espèce d'objet terrestre ou céleste, donnera de bonnes images, et qu'il produira un effet optique en rapport avec son étendue diamétrale.

Mais pour juger sûrement du résultat, et pour en donner une expression moins vague que celle qu'on emprunte habituellement au langage ordinaire, il convient de diriger le miroir monté en télescope newtonien vers une mire lointaine, systématiquement composée de manière à offrir à l'observation des détails placés à la limite de visibilité. On construit ces mires d'épreuve en traçant sur une lame d'ivoire des séries de divisions partagées en groupes successifs où le millimètre est fractionné en parties de plus en plus petites. La largeur du trait doit varier d'un groupe à un autre en proportion telle, que dans chacun d'eux les espaces noircis aient la même étendue que l'intervalle qui les sépare (*fig.* 18). Quand on considère à l'œil nu une pareille mire placée à distance ou qu'on l'observe avec un instrument trop faible, les différents groupes présentent une teinte grise uniforme. Mais si l'on diminue la distance ou si l'on prend des instruments plus puissants, on voit les groupes de divisions les plus écartées se résoudre en traits distincts, tandis que les autres restent confondus. En augmentant le grossissement, et en éclairant suffisamment la mire, on s'assure que dans les groupes qui demeurent uniformément gris, la confusion des traits n'est pas imputable à l'impuissance de l'œil : elle est donc à mettre tout entière sur le compte de l'instrument qui résout l'un des groupes et ne résout pas le suivant. En constatant ainsi quel est le groupe dont les divisions se trouvent par leur rapprochement placées à la limite de visibilité, on acquiert la preuve positive que l'instrument sépare les parties écartées par un certain espace angulaire, et ne sépare pas celles qui sont plus rapprochées les unes des autres. Il suit de là que l'aptitude de l'instrument à pénétrer les détails des objets observés, ou ce qu'on peut appeler son *pouvoir optique*, est inversement proportionnel à l'angle limite de séparabilité des divisions contiguës : il a en définitive pour expression le quotient de la distance de la mire par l'intervalle moyen des dernières parties distinctes.

Nous avons soumis à ce genre d'épreuve un grand nombre de miroirs de toutes

dimensions et de toute longueur focale; ces expériences nous ont conduit à une expression générale des pouvoirs optiques qui est d'une remarquable simplicité. Nous avons trouvé que ce pouvoir optique est indépendant de la longueur focale, qu'il varie uniquement et proportionnellement avec l'étendue transversale du miroir, et qu'il peut être compté sensiblement à raison de 150,000 unités par 10 centimètres de diamètre. Sans avoir opéré des déterminations aussi nombreuses sur les objectifs achromatiques, nous avons cependant reconnu, en les réduisant à leur surface efficace, qu'ils sont soumis à la même loi, et qu'à diamètres égaux, lunette et télescope sont susceptibles du même pouvoir optique.

Ce fait, qui désormais paraît établi, conduit naturellement à rechercher dans la constitution physique de la lumière, et non dans l'imperfection des instruments, l'obstacle qui limite l'extension des effets déjà obtenus. Quelle que soit la variété de construction dont ils sont susceptibles, ces instruments, à mesure qu'ils approchent de la perfection, tendent à accuser des pouvoirs optiques qui soient dans un rapport constant avec les diamètres respectifs des faisceaux admis. On ne saurait donc se refuser à considérer ce rapport comme une constante physique dont la valeur exprime l'aptitude de la lumière à former des images plus ou moins détaillées. En prenant pour unité de longueur le millimètre, auquel on rapporte habituellement l'ondulation lumineuse, on trouve, d'après les mesures expérimentales des pouvoirs optiques, pour la valeur de cette constante, le nombre 1500. Cette constante optique de la lumière est intimement liée à la longueur d'onde et lui est inversement proportionnelle, en sorte qu'elle varie pour les rayons de différentes couleurs de manière à assurer la plus grande puissance de définition aux rayons les plus réfrangibles, ce que l'expérience a confirmé bien des fois notamment, par la netteté remarquable des épreuves photographiques d'objets microscopiques, qui s'engendrent sous l'action prépondérante des rayons ultra-violets.

En général les constantes physiques ont une raison d'être qui découle directement de la nature de l'agent dont elles définissent les propriétés fondamentales. Évidemment ce nombre 1500, qui exprime en quelque sorte la *séparabilité* des éléments lumineux, procède du nombre d'ondulations contenues dans l'unité de longueur, et multiplié par un certain coefficient qui dépend à la fois du procédé employé pour déterminer les pouvoirs optiques, et de l'aptitude physiologique de la rétine à percevoir les impressions différentielles.

Il est à craindre qu'en essayant de donner cours à la notion des pouvoirs optiques nous provoquions, sans le vouloir, l'annonce de pouvoirs impossibles; il n'est rien dont on n'abuse; aussi, pour mettre les observateurs en garde contre des assertions illusoires, avons-nous pris soin d'indiquer les moyens d'obtenir des déterminations comparables, tout en insistant sur l'existence d'une limite absolue à l'exaltation des pouvoirs réalisables par les instruments d'optique.

Il y a cependant à réserver le cas où les instruments seraient éprouvés sur le ciel. Par un temps très-pur il pourra arriver que l'observation des étoiles doubles de grandeurs égales révèle un pouvoir optique plus fort, et jusqu'à deux fois plus élevé que celui qu'on aurait conclu de l'observation de mires terrestres. Voici l'explication de cette discordance possible. Dans la mire terrestre, les détails qu'on cherche à distinguer sont des espaces égaux alternativement noirs et blancs; c'était là une disposition nécessaire pour retomber facilement en toute occasion dans des conditions identiques d'éclairement et d'observation. Mais cette égalité des noirs et des blancs n'est pas à beaucoup près la condition la plus favorable à la résolution de l'ensemble. En effet, dans l'image d'un pareil système la largeur des blancs est égale à leur étendue géométrique augmentée du diamètre sensible inhérent à la grandeur des disques élémentaires, en sorte qu'au moment où ces blancs commencent à se confondre, ils ont une largeur double de celle qu'ils présenteraient, si dans l'objet les parties blanches étaient infiniment petites par rapport aux noires; mais au ciel la dimension réelle des étoiles doubles est infiniment petite par rapport à l'espace qui les sépare. Aussi leur étendue dans l'image se trouve-t-elle réduite à celle des disques élémentaires, ce qui fait que par une atmosphère homogène leur séparation à égalité d'angle sous-tendu est plus facile que celle de la mire. Nous ne sommes pas en mesure de dire combien le pouvoir optique déterminé sur les étoiles l'emporte sur celui que fournit l'observation d'une mire divisée, mais nous avons reconnu qu'il est effectivement plus considérable. Un télescope de 33 centimètres qui nous a fourni la première occasion de revoir le dédoublement du compagnon bleu de γ Andromède, en vertu de son pouvoir optique, évalué à 400,000, semblait ne devoir atteindre que la demi-seconde. Cependant on estime à $\frac{4}{10}$ de seconde le petit arc sous-tendu par le système binaire des étoiles bleues de γ Andromède.

Nous avons exprimé d'une manière générale que dans un instrument parfait le pouvoir optique est indépendant de la distance focale. Si l'on tient à s'en rendre compte, il faut analyser la constitution des images réelles en suivant pas à pas les déductions de la théorie. Dans une image parfaite, le nombre des points distincts dépend évidemment de l'étendue des disques élémentaires qui représentent les différents points de l'objet. Or comme ces disques sont limités par un cercle obscur qui est le lieu géométrique de tous les points où une moitié du faisceau lumineux est en discordance de vibration avec l'autre moitié, il en résulte que l'étendue de ces disques dépend à la fois de la longueur d'onde et de l'angle de convergence des rayons extrêmes. Pour une longueur d'onde invariable, et pour un diamètre constant de la base du faisceau, l'image varie en étendue avec la distance

focale; mais comme l'étendue des disques élémentaires varie sensiblement dans le même rapport, il en résulte que le nombre des parties distinctes ne change pas. C'est en se fondant sur ce genre de considération qu'on a été conduit à construire des instruments à court foyer sans crainte de porter atteinte aux pouvoirs optiques.

Mais si réellement ce pouvoir ne dépend que du diamètre de la surface utile de l'objectif, on doit s'attendre, en réduisant par un diaphragme la surface agissante d'un miroir reconnu comme bon, à diminuer proportionnellement l'effet optique. Ce résultat, qui était prévu, semblait tellement contraire à ce qui arrive ordinairement, qu'il nous a semblé utile de le constater d'une manière directe.

L'expérience a été répétée plusieurs fois sur des instruments de toutes dimensions, et il est maintenant constaté que par l'application des retouches locales on porte les miroirs à ce degré de perfection où ils ne supportent aucun diaphragme sans perdre de leur puissance optique. De là résulte un nouveau caractère et une épreuve bien simple à consulter pour reconnaître la valeur des instruments, car suivant qu'ils perdent ou qu'ils gagnent à être plus ou moins diaphragmés, on jugera d'une manière décisive s'ils approchent plus ou moins de la perfection.

Tous ces faits sont autant de confirmations en faveur de la théorie des ondulations. Dans l'ancienne théorie, le foyer est simplement le point de croisement de rayons indépendants; plus il y a de rayons, plus il y a d'intensité, mais moins il y a de chances que le croisement ait lieu en un point unique. Suivant le système des ondulations, le foyer qui se forme au sein d'un milieu homogène est le centre d'ondes sphériques de mouvements concordants; plus l'onde a d'étendue, mieux ce centre est déterminé. Les rayons que l'on considère géométriquement n'ont pas d'existence individuelle, ce sont de simples directions de propagation. Parmi les prétendus rayons qu'une surface est chargée de grouper en foyer, il n'en est pas d'indifférents; ceux qui vibrent en concordance se constituent effectivement en foyer limité; ceux qui par une imperfection de surface ont subi une différence de marche capable de les mettre en discordance, sont rejetés à une certaine distance des premiers sans jamais en approcher au delà d'une certaine limite; il y a discontinuité entre les rayons concordants et les rayons discordants, et cette discontinuité s'accuse par la présence d'un cercle noir qui règne comme un rempart autour du gros des rayons efficaces. Que si par des retouches locales on s'applique à ramener les rayons déviés, on remarquera que jamais ils ne pénètrent dans cet espace obscur, qu'ils l'évitent et le franchissent comme par l'effet d'un équilibre instable, pour se réunir, en les pressant, au groupe des rayons concordants.

Cette discontinuité dans la marche des rayons appelés à devenir efficaces explique un phénomène dont la singularité nous a souvent frappé. Quand une surface,

même très-incorrecte, est seulement de révolution, le phénomène qui se remarque pendant les tâtonnements de la mise au point consiste en ce que, dans une étendue plus ou moins considérable de part et d'autre du meilleur foyer, on constate la présence d'une image qui ne cesse pas d'être nette, tout en se détachant sur un fond de lumière ambiante. Assurément, si les rayons déviés pouvaient approcher de plus en plus du foyer, ce phénomène n'apparaîtrait pas, attendu que les foyers successifs formés par les différentes zones seraient continûment noyés les uns par les autres. Mais comme en réalité tout foyer est cerné et comme préservé de la confusion par un anneau noir, la zone quelle qu'elle soit qui forme image dans le plan où l'on observe, est bornée, de part et d'autre, de zones inefficaces qui assurent à sa propre image la faculté de dominer sur le fond lumineux formé par la dissémination brusque des autres rayons.

La même explication rend compte du phénomène de doublure qui se produit si fréquemment dans les grands instruments. Les opticiens supposent que la doublure des images est due à un accident de travail, qui partage l'étendue de l'objectif en deux surfaces discontinues séparées par une arête de rebroussement. Cette explication n'est nullement fondée, car jamais on ne constate directement ni intersection, ni discontinuité de surface. En réalité, la doublure des images résulte de la superposition, dans l'appareil convergent, de deux défauts distincts : elle se produit toutes les fois que l'objectif est entaché d'une aberration générale positive ou négative, et que de plus il présente deux sections méridiennes rectangulaires de courbures inégales. On comprend, en discutant les chemins parcourus, qu'en pareil cas il se forme dans le cône convergent deux groupes excentriques de rayons efficaces, et que les rayons centraux laissés en discordances deviennent inefficaces dans leur direction normale. On produit à volonté le phénomène de doublure des images, en choisissant un miroir affecté d'aberration, et en le comprimant suivant un diamètre. Quand l'aberration est positive, la doublure se produit perpendiculairement au diamètre comprimé ; dans le cas contraire, elle se manifeste parallèlement à ce même diamètre.

Si maintenant on considère que cet anneau noir qui entoure l'image focale de chaque point lumineux, et qui concourt si puissamment à donner de la fermeté aux images, a aussi pour effet de rejeter les rayons nuisibles à une distance sensible des rayons utiles, on jugera combien sa présence doit favoriser l'application du troisième procédé d'examen des surfaces, lequel a précisément pour objet d'établir, par l'interposition du bord d'un écran opaque, le départ entre les uns et les autres.

Lorsque par l'effet des retouches tous les rayons nuisibles sont rentrés dans l'ordre, on n'en saurait conclure, comme nous l'avons déjà dit, que la surface

réfléchissante réalise en toute rigueur la perfection géométrique; mais il en résulte que les écarts qui subsistent sont contenus dans des limites dont on peut déterminer, par des considérations très-simples, la minime étendue. La formation d'un foyer exact implique la concordance rigoureuse ou l'égalité absolue des chemins parcourus par tous les rayons. Si donc il y a formation d'un foyer sensiblement parfait, ce n'est pas exagérer que d'admettre que tous les rayons concordent à moins d'une demi-ondulation près, car ceux qui seraient en différence de marche d'une longueur de chemin plus grande, seraient rejetés en dehors du premier anneau noir, et viendraient renfoncer les anneaux extérieurs. Or l'ondulation moyenne est d'un demi-millième de millimètre, et la demi-ondulation d'un quart de millième; mais si quelque portion de la surface est en erreur d'une certaine quantité, cette erreur réagira sur les chemins parcourus où elle sera doublée par la réflexion, et puisque, par hypothèse, tous les rayons s'accordent à moins d'une demi-ondulation, il en résulte que tous les points de la surface réelle approchent de la surface théorique à moins d'un huit-millième de millimètre près, soit un dix-millième. Tel est, indépendamment de l'étendue des surfaces, le degré de précision que comporte l'application des retouches locales poussée jusqu'au point de réaliser des foyers physiquement parfaits. Interrogé sur des quantités de cet ordre, le sphéromètre ne répond plus qu'avec incertitude; comment donc une machine à travailler le verre pourrait-elle les atteindre? Il fallait s'en tenir au travail à la main, et encore la main de l'homme n'agit-elle pas seule, et doit-elle à tout instant se guider d'après les indications mêmes de la lumière.

En résumé, dans ce chapitre, spécialement consacré aux pouvoirs optiques, nous établissons qu'il existe un ensemble de caractères auxquels on reconnaît qu'une surface approche de la perfection. Soumises à l'épreuve des différents procédés d'examen, de telles surfaces cessent de montrer aucun défaut perceptible. Les images qu'elles donnent prennent un bon aspect qui se conserve dans les plus forts grossissements, les contours deviennent vifs et se montrent distinctement accompagnés des franges pâles de la diffraction. De plus, si l'on en vient à l'application des diaphragmes, on reconnaît qu'aucune partie de l'objectif ne peut être masquée sans qu'il en résulte un affaiblissement comparable de l'effet optique.

Afin de donner une expression numérique du pouvoir optique, nous le considérons comme inversement proportionnel à l'angle limite sous lequel s'opère la séparation des plus proches détails distinctement visibles au foyer d'un instrument, et nous prenons pour objet d'épreuve une mire lointaine formée d'espaces contigus alternativement noirs et blancs qui, par leurs distances entre eux et à l'instrument, se placent à la limite de visibilité. Le pouvoir optique se trouve alors

exprimé par le quotient de la distance de la mire au centre optique de l'objectif divisé par l'écartement moyen des parties homologues.

A la suite d'un grand nombre de déterminations effectuées sur des miroirs et des objectifs réfracteurs de toutes dimensions et de toute longueur focale, il est reconnu que le pouvoir optique dépend uniquement du diamètre de la surface efficace, et par suite que ce pouvoir et ce diamètre sont dans un rapport constant qui caractérise la lumière blanche et exprime d'une manière générale la délicatesse de l'agent ou sa puissance virtuelle de séparation.

En prenant pour unité de longueur le millimètre auquel on rapporte habituellement l'ondulation lumineuse, on trouve pour cette constante moyenne de la lumière blanche un nombre sensiblement égal à 1500; d'où l'on tire par une simple proportion la valeur du pouvoir optique maximum d'un objectif de dimension quelconque.

Nous insistons sur l'existence réelle d'un pouvoir limite ou absolu, afin de bien établir ce qu'on doit attendre d'un instrument d'une dimension donnée, et aussi pour détourner les artistes d'annoncer ou de chercher à obtenir des résultats impossibles.

Argenture sur verre, application aux miroirs de télescope.

On connaît aujourd'hui un certain nombre de procédés pour réduire l'argent à la surface du verre poli. Dans l'origine, ces procédés ont eu seulement pour objet de former une sorte d'étamage destiné, comme celui des glaces d'appartement, à briller d'un éclat spéculaire du côté appliqué contre le verre et visible à travers sa substance. On n'avait à s'inquiéter ni de l'égalité d'épaisseur de la couche déposée, ni de son adhérence plus ou moins intime, ni du degré de poli qu'elle conservait à son revers ; on ne redoutait pas de favoriser la réaction par une certaine élévation de température, mais on avait à tenir compte de la question d'économie

Dans l'application aux usages de l'optique, les frais d'argenture sont à peu près insignifiants, et l'on a toute latitude pour satisfaire à des conditions qui prennent une importance majeure du moment où la couche métallique chimiquement déposée est appelée à réfléchir la lumière par sa surface extérieure, à former des images et à reproduire en toute exactitude la surface sous-jacente du verre. Le procédé Drayton, auquel l'industrie reproche d'employer comme dissolvants, des alcools très-purs, et comme agents réducteurs, des substances balsamiques et essentielles d'un prix élevé, est celui que nous avons employé à l'époque de nos premiers essais et qui, après trois années d'expérience, nous paraît encore mériter la préférence. Il agit à la température ordinaire, et la couche d'argent qu'il forme

sur le verre est déjà miroitante au sortir du bain; elle présente une épaisseur uniforme et se montre suffisamment adhérente pour supporter le frottement prolongé d'une peau rougie d'oxyde de fer; ainsi polie, elle réfléchit environ 75 pour 100 de la lumière incidente.

Le procédé, tel qu'il nous a été communiqué par MM. Power et Robert, qui disposent actuellement du brevet Drayton, avait déjà subi des perfectionnements qui le rendaient d'une application plus facile et d'un emploi moins dispendieux. En n'hésitant pas à nous en faire part, en y joignant tous les renseignements qui pouvaient suppléer à notre inexpérience, MM. Power et Robert ont singulièrement facilité nos recherches et se sont acquis tous les droits à notre reconnaissance et à nos remercîments.

Nous n'avons rien eu à changer au fond du procédé; mais par la nécessité d'en faire une application nouvelle et très-délicate, nous avons été conduit à régulariser des détails de manipulation, à changer quelque peu les proportions des éléments qui entrent dans la formule et surtout à étudier par excès ou par défaut l'influence empirique de chacun d'eux. C'était la seule marche à suivre pour arriver en toute circonstance à tirer le meilleur parti des produits variables que l'on trouve dans le commerce.

Il y a trois opérations à exécuter successivement sur un miroir de verre pour lui communiquer le vif éclat métallique de l'argent : la préparation ou le nettoyage préalable de la surface, la formation du dépôt d'argent et le polissage de cette même couche de métal.

La préparation de la surface de verre qui doit recevoir le dépôt d'argent exerce une grande influence sur la manière dont la réduction s'opère. La solution argentifère, qui possède la propriété spéciale de se réduire au contact des parois solides et polies, agit d'autant plus vite et forme un dépôt d'autant plus adhérent et homogène, que cette paroi est plus pure de corps étranger à sa propre substance. Mais pour qu'une surface de verre présente ce degré de pureté chimique, il ne suffit pas qu'elle apparaisse à l'œil parfaitement nette et brillante, il faut qu'en la nettoyant on ait recouru à des précautions d'une efficacité assez éprouvée pour n'exiger d'autre vérification que celle de l'argenture même.

Que la surface ait été déjà argentée ou non, on commence par la mouiller de quelques gouttes d'acide nitrique pur que l'on étend rapidement au moyen d'un tampon de coton, puis on lave cette surface à l'eau et on l'essuie avec un linge sec. En cet état la surface ne retient plus que ce qui provient de l'eau elle-même et du linge dont on s'est servi pour l'essuyer. Pour arriver sinon à la purifier d'une manière complète, du moins à lui communiquer un état uniforme, on la saupoudre de blanc d'Espagne, on ajoute assez d'eau distillée pour

former une pâte qu'on étend au moyen d'un tampon de coton. La pièce est laissée à plat pendant le temps nécessaire à l'évaporation de l'eau; les principes solubles se fixent alors dans le blanc qui recouvre la pièce et leur sert d'excipient. Il faut qu'à son tour ce blanc disparaisse. On prend du coton dans la carde, on évite de le serrer, et par un frottement léger on attaque la couche de blanc qui se détache et laisse la surface encore recouverte d'un voile uniforme. C'est ce voile qui, une fois enlevé, laissera le verre dans l'état le plus propice à recevoir l'argenture. On forme donc un nouveau tampon par superposition de couches régulières empruntées à la carde, on en frotte légèrement tous les points de la surface en prenant soin d'écarter la couche superficielle de coton à mesure qu'elle se charge de blanc. Par ce moyen, le voile qui régnait sur le verre se dissipe peu à peu sans solution de continuité, sans ligne de démarcation appréciable. On sent alors que le tampon glisse sur une surface nette ; c'est le moment de prendre un tampon plus ferme pour agir énergiquement sur le verre en insistant particulièrement près des bords. Au bout d'un certain temps, quand on suppose que la surface n'a plus rien à gagner, on chasse avec le coton les poussières qui tendent à s'attacher au verre électrisé par le frottement, et l'on pose la pièce sur champ en attendant qu'on l'immerge dans le bain d'argenture. Mais avant de décrire cette manipulation, il convient de donner la formule à suivre pour préparer la solution.

La composition du bain d'argent est assez complexe : il y entre comme matières premières de l'eau, de l'alcool, du nitrate d'argent, du nitrate d'ammoniaque, de l'ammoniaque, de la gomme galbanum et de l'essence de girofles. Avant d'entrer dans le bain définitif, ces éléments s'unissent dans des solutions provisoires dont nous allons donner la composition.

(1). *Ammoniaque étendue*. On part de l'ammoniaque pure du commerce et on l'étend d'eau distillée jusqu'à ce que la solution marque 13 degrés à l'aréomètre de Cartier.

(2). *Nitrate ammoniacal d'ammoniaque*. Dans 200 grammes d'eau, on dissout 100 grammes de nitrate d'ammoniaque sec et on ajoute 100 centimètres cubes de la précédente solution d'ammoniaque étendue ; on a ainsi une solution composée comme il suit :

Nitrate d'ammoniaque sec	100 gr.
Eau distillée	200 »
Ammoniaque à 13 degrés (Cartier)	100 c. c.

(3). *Teinture de galbanum*. On trouve dans le commerce, sous le nom de gomme galbanum, une gomme-résine un peu molle, blonde et douée d'une forte odeur vireuse ; on rejette celle qui est friable ou compacte et sans odeur, ou verdâtre et

mêlée d'une sorte de chapelure inerte. On prend environ 20 grammes de la substance pour 80 centimètres cubes d'alcool rectifié à 36 degrés, on malaxe le tout dans un mortier de porcelaine chauffé à 40 ou 50 degrés, et l'on obtient une solution de la partie résineuse troublée par une gomme insoluble. On décante dans un flacon et on laisse reposer. On filtre la partie liquide, on épuise le dépôt opaque et par addition d'alcool on ramène cette solution à marquer 29 degrés à l'aréomètre de Cartier.

(4). *Teinture de girofles*. C'est une solution qui résulte du mélange de l'alcool et de l'essence dans les proportions suivantes :

Essence de girofles	25 c. c.
Alcool à 36 degrés (Cartier)	75 »

De tous les produits déjà énumérés on forme ensuite un mélange ainsi composé :

Nitrate d'argent fondu	50 gr.
Eau distillée	100 c. c.
Nitrate ammoniacal d'ammoniaque (2)	7 »
Ammoniaque étendue (1)	24 »
Alcool rectifié à 36 degrés (Cartier)	450 »
Teinture de galbanum (3)	110 »

On fait d'abord dissoudre le nitrate d'argent dans l'eau, puis on ajoute le nitrate d'ammoniaque, qui a pour effet d'empêcher la solution de précipiter par l'addition de l'ammoniaque libre. L'alcool vient à son tour, et en dernier la teinture de galbanum. En d'autres termes, les produits doivent être incorporés les uns aux autres, suivant l'ordre même où ils figurent dans la formule.

La solution qui en résulte brunit promptement et forme un précipité qui se dépose en quelques jours. On décante la partie claire et on la porte dans l'obscurité, où on la conserve pour l'usage sous la désignation de *solution normale*. Cette solution, inactive par elle même, est cependant très-disposée à se réduire au contact du verre du moment où l'on y ajoute 3 pour 100 de teinture de girofles (4).

Cependant le dépôt qui se forme rapidement à 15 ou 20 degrés centigrades, malgré le bon aspect qu'elle présente, ne possède pas toute la consistance nécessaire pour résister à un polissage ultérieur. L'addition de 4 à 5 pour 100 d'eau pure, qui ralentit la réaction, communique en même temps au dépôt d'argent une plus grande solidité. Si l'on ajoutait trop d'eau, la solution deviendrait de plus en plus tardive, et la couche d'argent à peine formée s'arrêterait dans son développement à un degré de minceur où elle ne posséderait pas encore son entier coefficient de réflexion. C'est donc à l'observation et à l'expérience à décider précisément de la quantité d'eau qu'il convient d'ajouter à la solution normale pour en obtenir le meilleur dépôt.

Il en est de même de l'ammoniaque qui, entrant dans le mélange en très-petite quantité, n'est presque jamais dosée du premier coup d'une manière assez précise. Par insuffisance d'ammoniaque, la solution peut rester tardive, et alors il y a à distinguer si ce défaut provient d'un excès d'eau ou du manque d'alcali. Quand c'est l'ammoniaque qui manque, le dépôt d'argent retiré du bain présente une couleur violette très-prononcée et semble recouvert d'un voile blanchâtre. Si au contraire l'alcali était en excès, la solution sous l'influence du girofle se réduirait en masse et au détriment de l'action élective des parois, et le dépôt sortant du bain serait terni et recouvert d'une couche pulvérulente d'un gris foncé. La juste proportion d'ammoniaque est celle qui communique au dépôt une riche couleur d'or tirant sur le rose, avec formation d'un léger voile gris-cendré. Mais tandis que l'addition de l'eau s'effectue par centièmes, les tâtonnements qui concernent l'ammoniaque pure et concentrée ne doivent porter que sur les millièmes. Si par une erreur on avait ajouté de l'ammoniaque en excès, la solution ne serait pas perdue pour cela, car il serait facile de la réparer par l'acide nitrique : il n'en résulterait qu'une légère augmentation dans la dose du nitrate d'ammoniaque qui n'exerce pas sur le dépôt d'influence nuisible. En somme, c'est par l'eau et l'ammoniaque qu'on met pour ainsi dire les solutions au point. Pour éviter les pertes de temps, on fera bien de préparer à l'avance de grandes quantités de solution normale, de les réunir dans un seul flacon, de les traiter en masse pour les amener au point, et de les conserver hermétiquement bouchées sous la dénomination de *solution éprouvée*.

On ne doit tenter d'argenter une pièce importante que lorsqu'on a une solution déjà ancienne et éprouvée d'avance. L'opération s'exécute pour les grandes pièces dans des bassines en cuivre argentées intérieurement par la galvanoplastie, et qui ne s'attaquent pas au contact du nitrate d'argent. Il faut qu'elles soient de grandeur appropriée à celle de la pièce et que le diamètre du fond dépasse de 3 à 5 centimètres celui de la surface à argenter. Pour les miroirs de petites dimensions, on peut se contenter des porcelaines plates que l'on trouve dans le commerce.

Il est indispensable de terminer le revers des miroirs par une surface polie, et de laisser cette surface libre de tout obstacle qui, gênant, l'accès de la lumière, empêcherait de surveiller les progrès de l'argenture; aussi, dès qu'un miroir est assez grand pour qu'on ne puisse plus le manier avec sécurité en le saisissant uniquement par les bords, devient-il nécessaire de creuser sur la tranche une gorge où s'insèrent deux anses de cordes solidement fixées par plusieurs tours de ficelle. Il faut encore préparer trois fiches en bois, ou mieux en baleine, effilées en biseau, que l'on glisse sous le bord du miroir aussitôt après son immersion dans le bain pour l'isoler du fond du vase et ménager un espace à la circulation du liquide. Enfin,

quand on opère sur des pièces d'un poids considérable, on fait reposer la bassine sur une planche garnie de courbes qui en forment une sorte de berçoir. Dans tous les cas, l'opération doit se faire au grand jour et dans un local porté à une température de 15 à 20 degrés, car la lumière et la chaleur exercent une influence indispensable sur la réduction de l'argent.

Lors même que la surface à argenter aurait subi un nettoyage irréprochable, si l'immersion dans le bain n'était pas faite avec toutes les précautions requises, il pourrait encore survenir dans l'argenture diverses espèces de taches, des inégalités ou des temps d'arrêt. La bassine étant nettoyée au blanc d'Espagne, on prépare, pour y verser la solution, un grand cornet de papier collé que l'on engage dans un entonnoir comme un papier à filtrer et dont on coupe la pointe pour ménager un orifice d'écoulement de 2 à 3 millimètres de diamètre. Cet orifice est maintenu à 3 ou 4 centimètres au-dessus du fond de la bassine. Au moment même d'opérer, on mélange, en les agitant dans un même vase, la solution éprouvée et les 3 pour 100 de teinture de girofles qui déterminent la réaction; on en verse aussitôt dans la bassine une petite quantité que l'on se hâte d'étaler avec un tampon de coton, puis, aussitôt, on verse dans le cornet le reste qui s'écoule par l'orifice en renouvelant sa surface, et ne rencontre en se répandant que des parois déjà mouillées. On saisit alors le miroir par les anses, on le présente obliquement pour le faire reposer d'abord sur l'angle de la surface principale, et on l'abaisse d'un mouvement uniforme qui détermine l'envahissement progressif de la nappe liquide; on glisse pour l'isoler du fond les fiches en trois points équidistants, et l'on pose la bassine sur le berçoir en l'exposant librement au grand jour. A partir de ce moment, on n'a plus qu'à agiter doucement le liquide en inclinant l'appareil d'un côté et de l'autre, et en faisant tourner de temps en temps la bassine sur elle-même.

Dans les premiers instants avant que la réaction commence, la surface immergée dans un liquide moins réfringent que le verre donne des objets extérieurs une image perceptible à travers l'épaisseur du disque; mais bientôt, sous l'influence du premier dépôt, cette image s'affaiblit, prend une teinte brunâtre, s'éteint presque complétement, puis soudain reparaît avec un éclat métallique où l'on juge que la réflexion a changé de nature. La durée du temps qui s'écoule entre l'immersion du miroir et la réapparition de l'image réfléchie est importante à noter, parce qu'elle sert de guide pour la durée totale de la réaction, qui généralement n'exige qu'un temps cinq à six fois plus long pour engendrer l'argenture complète. Dans les conditions moyennes de température et de lumière, la réapparition de l'image a lieu cinq minutes après l'immersion, et par un séjour dans le bain, qui se prolonge vingt à vingt-cinq minutes de plus, la couche d'argent acquiert toute l'épaisseur convenable.

Dès qu'on juge le dépôt suffisamment épaissi, on doit retirer le miroir, le laisser égoutter jusqu'à ce que le liquide menace de sécher, et le déposer dans une seconde bassine contenant de l'alcool ordinaire étendu par l'eau au point de marquer 67 degrés à l'alcoomètre de Gay-Lussac ou 25 degrés à l'aréomètre de Cartier. On l'agite jusqu'à ce que les égouttures ne soient plus colorées, et on le transporte dans une troisième bassine contenant de l'eau ordinaire filtrée. Une certaine agitation communiquée sans faire émerger la surface peut hâter la dissolution de l'alcool dans l'eau, mais il est toujours prudent de prolonger ce lavage au delà des six à huit minutes strictement nécessaires.

Le miroir est enfin porté dans l'eau distillée et de là posé sur sa tranche en contact avec un linge dans une position presque verticale, où on le laisse sécher. Quand l'opération a été bien conduite, on voit la nappe d'eau se retirer peu à peu et laisser à découvert une surface d'un jaune d'or tirant sur le rose et recouverte d'un léger voile gris-cendré. Examinée par transparence, cette couche d'argent ne laisse apercevoir que les objets vivement éclairés et les colore fortement en bleu.

Il s'agit maintenant d'enlever ce léger voile qui colore l'argent et diminue son éclat. L'expérience a appris qu'il faut commencer par frotter cette surface avec une peau de chamois disposée en un tampon mollement rembourré de coton cardé. On doit se garder d'étendre sur cette peau aucune poudre à polir, attendu que le frottement de ce premier tampon a principalement pour effet de fouler le dépôt d'argent, d'écraser le velouté inhérent à sa structure, et de lui communiquer une solidité qui lui permette de supporter un polissage complet.

Un singulier phénomène, qui ne manque jamais de se produire, semble démontrer qu'en effet, sous la douce pression exercée par cette peau, la couche d'argent se modifie dans sa constitution. La transparence dont elle jouit à un faible degré en sortant du bain, diminue notablement par le frottement, le bleu transmis devient plus foncé comme si de très-petits interstices capables de transmettre de la lumière blanche venaient à s'oblitérer par suite de l'écrasement des parties saillantes. Toujours est-il qu'une fois polie la couche d'argent, qui a plutôt perdu que gagné, transmet évidemment moins de lumière qu'auparavant. Quand le tampon de peau nue a produit son effet, on en prend un second disposé de même sorte, mais imprégné de rouge d'Angleterre fin et lavé avec le plus grand soin. On le promène légèrement en rond sur toutes les parties de la surface en insistant particulièrement sur les bords, qui ont toujours une tendance à rester en retard. Peu à peu l'argent recouvre sa blancheur et contracte un poli qui reproduit celui de la surface sur laquelle il repose. C'est le poli du verre dans sa perfection, rehaussé par l'intensité de l'éclat métallique. Pendant une heure ou deux, suivant l'étendue de la surface à polir, l'éclat spéculaire

va toujours croissant. Mais enfin, dès que le miroitage des objets ombrés donne un reflet d'un beau noir, on doit s'abstenir de prolonger un traitement qui finirait par altérer la texture de la mince couche d'argent.

Telle est dans tous ses détails la marche que nous avons suivie pour argenter régulièrement les miroirs de verre, sans que la surface en éprouve le moindre changement perceptible aux différents procédés d'examen.

Nous ne prétendons pas que tant de précautions soient rigoureusement indispensables à la réussite d'une argenture suffisante pour l'usage; mais ayant maintes fois observé que rarement on se résigne à accepter les moindres défauts qui viennent troubler l'uniformité d'une belle surface, nous avons compris que nous serions tenu d'indiquer, quels qu'ils soient, les moyens d'obtenir des miroirs sans taches.

Détails de construction sur les télescopes de grande dimension; disposition des oculaires; changements de grossissement; montage du miroir. — Nouveau pied parallactique en charpente.

En sortant des mains de Newton, le télescope a été bien des fois remanié par les savants et les artistes. Dans cet instrument, l'image formée au foyer du miroir ne se présente pas aussi naturellement à l'observation que celle qui résulte du concours de rayons réfractés; les dispositions qu'on a imaginées pour la rendre accessible reposent sur des artifices qui prêtent matière à discussion. Newton a pris dès l'origine le parti le plus sage, qui consiste à rejeter l'image sur le côté, et à l'observer au moyen d'un oculaire monté sur la paroi du tube, et dirigé perpendiculairement sur l'axe. Le cône des rayons convergents était réfléchi par un miroir plan incliné à 45 degrés qui était nécessairement placé en deçà du foyer, à une distance au moins égale au rayon du tube.

En vue d'éviter la perte d'intensité causée par une seconde réflexion métallique, on a tenté de remplacer le miroir oblique, par un prisme à réflexion totale qui agit sur le faisceau sans lui faire subir d'autre perte que celle qui provient de l'absorption et des réflexions partielles aux deux surfaces normales. Mais dans les grands instruments le prisme tend à prendre des proportions telles, qu'il devient presque irréalisable. Dans les instruments à court foyer, tels que ceux que nous avions en vue, ce prisme devait prendre des dimensions plus grandes encore, et menaçait, par ses imperfections propres, d'exercer sur les images la plus fâcheuse influence.

Nous avons pris le parti de briser près du sommet le cône des rayons par un prisme de petite dimension qui laisse l'image à l'intérieur du tube, pour aller ensuite chercher cette image au moyen d'un oculaire composé. Quelles que soient les préventions des observateurs contre l'oculaire à quatre verres, on ne peut mé-

connaître les nombreux avantages que présente cette disposition. Elle résout toute difficulté, car, au moyen d'un prisme réduit aux dimensions seulement suffisantes pour ne pas restreindre l'étendue du champ, elle réalise le bénéfice de la réflexion totale; de plus, comme ce prisme vient se placer à petite distance du foyer, il est hors d'état de compromettre l'image lors même qu'il laisserait à désirer relativement à la qualité de la matière, à l'exécution des surfaces et à la précision des angles. Enfin, ce qui ne nuit en rien, l'image vue dans l'oculaire à quatre verres se trouve redressée.

Cependant, comme l'oculaire composé a été conçu et organisé à l'occasion des lunettes, il arrive qu'en l'associant tel quel à des miroirs paraboliques à court foyer on fait reparaître une certaine aberration de sphéricité; c'est-à-dire que dans cet oculaire où se trouvent deux verres qui jouent réellement le rôle d'objectif, on recommence à éprouver les imperfections des courbures sphériques. A cet inconvénient le remède est bien simple : il consiste à opérer une dernière retouche qui, en sacrifiant l'image du miroir, aura pour effet de reporter la netteté sur l'image résultante du système optique composé du miroir et de la partie objective de l'oculaire. Par ce moyen, le miroir et le système des verres amplificateurs de l'image sont invariablement associés l'un à l'autre, et pour varier le grossissement on se borne à changer le système des deux autres verres, qui est en tout conforme à l'oculaire astronomique ordinaire. Nous n'en sommes donc plus à construire des miroirs exactement paraboliques, et nous croyons mieux faire en les terminant par une surface expérimentale, qui possède expressément la propriété d'agir de concert avec le système des verres amplificateurs de l'oculaire, pour assurer la perfection à l'image résultante.

Les considérations que nous avons développées, en parlant de la formation des images, nous ont servi à évaluer le degré de précision que réclame l'exécution des retouches locales ; ces mêmes considérations déterminent la limite où les déformations accidentelles du miroir commenceraient à nuire à la qualité des images. Si l'on veut que les images conservent leur netteté, il est indispensable que dans toutes les positions imprimées au miroir les divers éléments de la surface restent solidaires entre eux à la précision d'un dix-millième de millimètre, car tout déplacement relatif qui excéderait cette minime quantité mettrait certains rayons en discordance avec les autres, et les jetterait en dehors du groupe efficace. On comprend dès lors l'extrême importance des précautions à prendre pour détourner du miroir les forces qui tendraient à en altérer la figure.

Lorsque le miroir est placé au fond du tube et que l'instrument est obliquement dirigé vers un point quelconque du ciel, la pesanteur agit suivant deux com-

posantes restangulaires, l'une qui tend à comprimer le miroir dans la direction du diamètre compris dans un plan vertical, l'autre qui le presse contre les parties résistantes sur lesquelles il repose par son revers. Ces deux composantes, qui varient en sens contraires avec la direction de l'instrument, demandent à être combattues isolément. A celle qui comprime le miroir sur sa tranche, on ne peut opposer que la rigidité de la matière qui, sous un poids donné, prend une valeur maximum lorsqu'on termine le revers du miroir par une surface suffisamment convexe. Nous avons trouvé avantageux de faire tailler la face postérieure du miroir sur une courbe telle, que l'épaisseur aille en doublant du bord vers le centre où elle atteint au moins le dixième du diamètre. Ce n'est là du reste qu'un palliatif qui n'obvie pas radicalement à la déformation, mais en réalité cette composante diamétrale de la pesanteur n'est que peu redoutable, et parce qu'elle diminue à mesure que l'instrument s'élève vers le zénith, et parce que l'aplatissement qui pourrait en résulter dans la totalité des faisceaux convergents se corrigerait aisément par l'emploi d'une lentille cylindrique.

L'autre composante, dont l'intensité varie en sens inverse de la première, exerce sur l'image une influence beaucoup plus fâcheuse. A mesure que l'instrument se dresse, les parties solides sur lesquelles le miroir s'appuie font saillir les parties correspondantes de la surface, et déterminent des ondulations qui s'accusent au foyer par de longues traînées de lumière. Il faut supprimer ces pressions locales et les répartir uniformément sur toute l'étendue du revers du miroir. Solidairement avec la monture de ce miroir on fixe un plancher en bois, et l'on ménage entre deux un espace où l'on glisse un sac circulaire en caoutchouc qui, une fois gonflé, s'applique sur le verre. Le tube étroit qui conduit l'air dans ce coussin, circule le long du corps de l'instrument, se prolonge jusqu'à l'oculaire, et se termine par un robinet. En soufflant avec la bouche, l'observateur peut ainsi, sans perdre l'image de vue, régler à son gré la pression et l'amener précisément au degré suffisant pour que le miroir flotte dans sa monture, sans la presser ni par l'une ni par l'autre surface. Il est clair que dans ces conditions, le miroir échappe à la pesanteur, quant aux effets de la composante qui s'exerce totalement sur le coussin pneumatique. Le jeu régulier de l'appareil n'exige nullement que le miroir ait du ballottement dans sa monture, et l'addition du coussin n'augmente pas cette instabilité de l'axe optique qu'on a jusqu'à présent reprochée au télescope. Rien n'empêche d'assujettir le miroir dans son barillet en le saisissant près des bords en trois points équidistants. Le coussin, qui ne peut plus se déplacer en masse, n'en continue pas moins, suivant la pression, à modifier la surface et à réagir distinctement sur la netteté de l'image. Le cadre qui porte l'ensemble du miroir, du barillet, et du coussin pneumatique, se rattache au corps du télescope par des vis calantes

et butantes qui servent à régler l'axe optique par rapport au prisme et à le maintenir dans une position définie.

Le corps des nouveaux télescopes est en bois; il a la forme d'un tube octogonal. Des diaphragmes largement ouverts, et fixés intérieurement de distance en distance, communiquent au système une rigidité dont on tire partie dans la manière de le monter parallactiquement. Au tiers de sa longueur comptée à partir du miroir on a fixé (*fig.* 19) deux tourillons montés perpendiculairement sur la direction de l'axe de figure. D'un autre côté, on a construit une table tournante à deux colonnes, roulant par des galets sur un plateau orienté parallèlement à l'équateur et maintenu dans cette position par un bâti en charpente. Les deux colonnes de la table tournante sont armées de coussinets pour recevoir les tourillons du corps de l'instrument; de plus elles gardent l'écartement voulu et la hauteur suffisante pour le laisser passer librement. Le télescope étant donc posé à sa place se trouve suspendu parallactiquement, car son double mouvement s'exécute en déclinaison autour des tourillons, et en ascension droite autour de l'axe de la table tournante. L'observation prolongée d'un astre exige que l'instrument soit arrêté en déclinaison; c'est pourquoi on fixe sur le plateau tournant une sorte de bras dont l'extrémité se rattache en quelque point du corps du télescope par une barre à coulisse et à serrage qui figure un côté variable dans un triangle, et détermine l'ouverture de l'angle opposé.

Un disque métallique divisé à sa circonférence, et monté sur l'axe des tourillons, fait l'office de cercle de déclinaison, et des divisions tracées sur le contour du plateau équatorial figurent les parties d'un cercle horaire; mais les positions qu'ils indiquent ne comportent pas plus de précision que n'en exige la recherche d'un astre qu'on veut mettre dans le champ.

Ce système de pied ne constitue à vrai dire qu'un support disposé parallactiquement pour la commodité des observations, les mouvements en sont doux, et rien n'empêchera d'y ajouter au besoin un rouage moteur.

On construit en ce moment une semblable monture pour le télescope de 42 centimètres établi depuis plusieurs mois à l'Observatoire impérial. Le miroir a été fondu à Saint-Gobain, puis dégrossi et débordé dans l'usine Sautter et Cie, spécialement consacrée à la construction des phares lenticulaires. Depuis lors M. Sautter a préparé pour l'avenir, de bien plus grands disques, et nous avons reçu de lui l'assurance d'une coopération qui ne reculerait que devant une impossibilité matérielle; soulagée d'une préparation qui exigeait un outillage spécial, la maison Secretan a fait tout le reste, sauf les dernières retouches dont elle n'aurait pas accepté la responsabilité. Par les soins intelligents de M. Eichens, qui a la direction des ateliers, la partie mécanique se perfectionne et s'achève, en sorte qu'avant peu nous serons en possession de l'appareil complet.

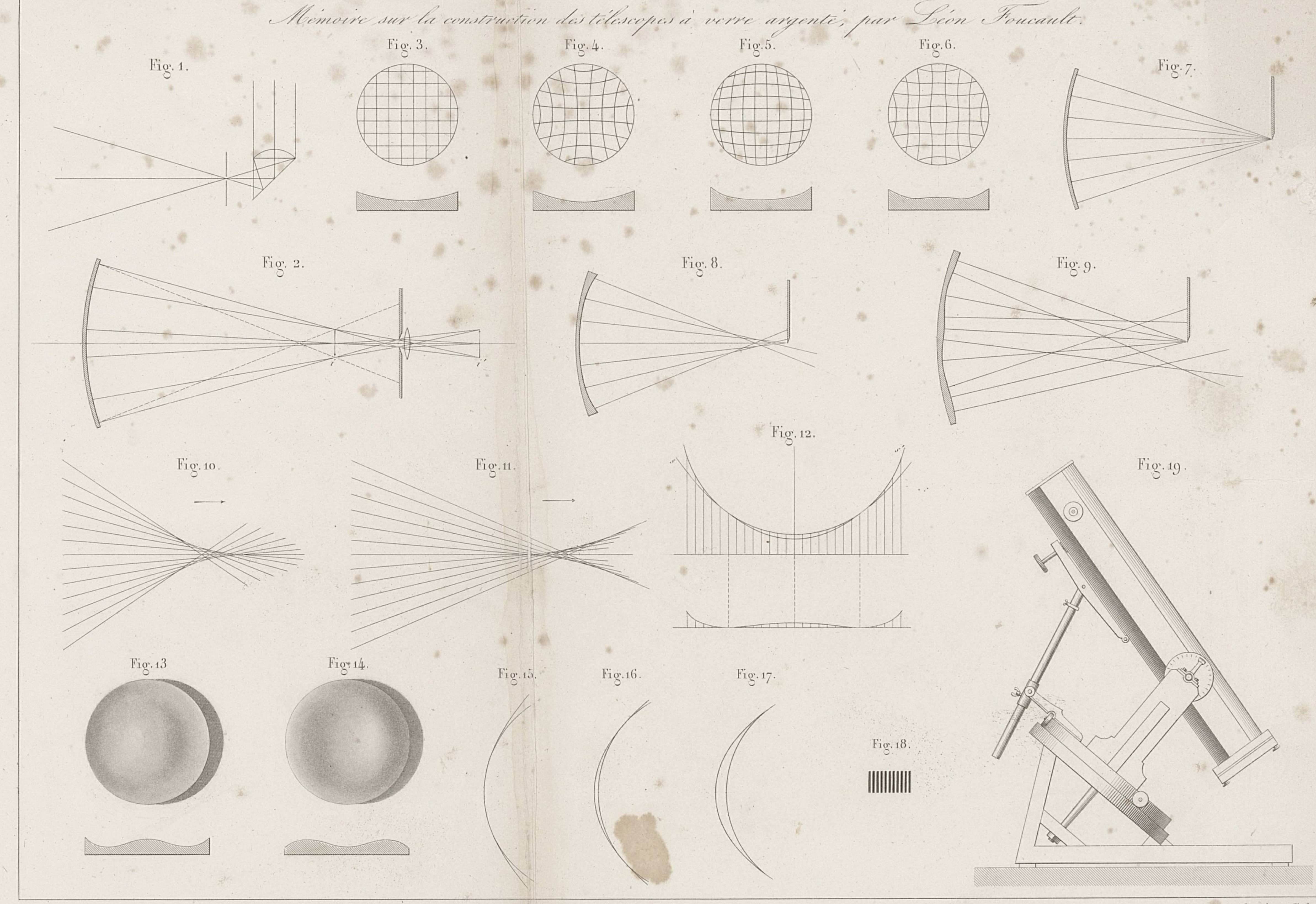
Nous voici parvenu au terme de cette série de détails, qu'il fallait tous indiquer, sous peine de laisser à d'autres le soin de rechercher ce que la pratique nous avait enseigné. Nous les avons donnés à titre de renseignements pour ceux qui souhaiteraient de reproduire les effets que nous avons obtenus. Parmi ces détails d'exécution, il en est un grand nombre que nous avons recueillis dans les ateliers de M. Secretan, et nous nous plaisons à reconnaître que ces rapports de chaque jour avec des ouvriers habiles, des contre-maîtres intelligents, et un chef d'établissement doué d'un esprit éclairé, nous ont considérablement abrégé notre tâche.

Cette tâche en quoi consistait-elle? Nous nous étions proposé, oú plutôt nous avions reçu du Directeur de l'Observatoire la mission de préparer les voies pour la taille des objectifs de grand diamètre. Fallait-il se contenter d'appliquer empiriquement en grand les méthodes dont on s'est contenté jusqu'ici pour le travail des verres? Quels résultats pouvait-on se flatter d'obtenir en compensation de l'accroissement des dépenses? A quoi jugerait-on d'avoir réussi? Savait-on seulement si dans l'état actuel, nos meilleurs instruments laissent carrière à d'importants progrès? N'y aurait-il pas en optique comme en mécanique un maximum d'effet utile qui viendrait tôt ou tard limiter nos efforts? Toutes ces questions étaient implicitement comprises dans la mission que nous avions reçue du Directeur.

En cherchant à les résoudre, il y avait danger, nous le voyons aujourd'hui, de s'engager dans une voie qui vraisemblablement était sans issue. Heureusement nous avons pris le chemin détourné et, délaissant provisoirement la réfraction, nous avons emprunté à la réflexion les moyens d'agir plus simplement sur la lumière, et d'en former correctement ce point focal où se révèle toute la théorie physique des images. Comme nous n'avions affaire qu'à une seule surface, comme par le fait même de la réflexion, la ligne d'expérience repliée sur elle-même se contenait à l'intérieur d'un emplacement fermé, et ramenait le point et l'image à proximité l'un de l'autre, nous avons pu, sans nous écarter de la figure sphérique, nous familiariser avec les moyens d'agir sur les surfaces de verre, de les observer et de les modifier à la demande des phénomènes optiques. Appliquant ensuite les mêmes procédés au cas où le point et l'image s'éloignent progressivement l'un de l'autre, nous avons vu se réaliser naturellement les surfaces qui procèdent des sections coniques, et qui étaient désignées depuis si longtemps comme spécialement propres aux usages de l'optique ; et maintenant que l'expérience est acquise, nous n'hésiterions pas à faire sur les objectifs achromatiques, l'application d'une méthode qui n'a rien à redouter de la complication analytique des surfaces. Cependant les miroirs de verre qui n'étaient qu'accessoires, ont emprunté à l'argenture un éclat métallique si remarquable, que maintenant ils rivalisent avec les objectifs de même dimension.

Sans perdre de vue l'objet principal de ce travail, qui était de fournir des résultats pratiques, nous avons été conduit, chemin faisant, à reconnaître l'insuffisance des considérations purement géométriques sur lesquelles on se fondait pour établir la théorie des instruments d'optique. Tous les faits observés condamnent un système dans lequel on ne tient aucun compte du caractère périodique de l'agent lumineux, où par suite on néglige l'élément principal qui intervient dans le mécanisme de la formation des images; ils démontrent au contraire qu'au foyer des surfaces appropriées par leur degré de précision à la constitution intime de la lumière, les rayons obéissent au principe fondamental des interférences. Ainsi se justifie dans ses dernières conséquences une doctrine que l'esprit humain s'est donnée pour guide, et qui paraît devoir embrasser l'universalité des phénomènes de l'optique physique.

PARIS. — IMPRIMERIE DE MALLET BACHELIER,
Rue du Jardinet, 12.



Legay imp. r. de la Bucherie, 1. Paris. Mallet-Bachelier, éditeur. Gravé par Dulos.

PARIS. — IMPRIMERIE DE MALLET-BACHELIER, GENDRE ET SUCCESSEUR DE BACHELIER,

RUE DU JARDINET, 12.

inches | centimeters

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 (A)	12	13	14	15
L*	39.12	65.43	49.87	44.26	55.56	70.82	63.51	39.92	52.24	97.06	92.02	87.34	82.14	72.06	62.15
a*	13.24	18.11	-4.34	-13.80	9.82	-33.43	34.26	11.81	48.55	-0.40	-0.60	-0.75	-1.06	-1.19	-1.07
b*	15.07	18.72	-22.29	22.85	-24.49	-0.35	59.60	-46.07	18.51	1.13	0.23	0.21	0.43	0.28	0.19
Density										0.04	0.09	0.15	0.22	0.36	0.51

	16 (M)	17	18 (B)	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
L*	49.25	38.62	28.86	16.19	8.29	3.44	31.41	72.46	72.95	29.37	54.91	43.96	82.74	52.79	50.87
a*	-0.16	-0.18	0.54	-0.05	-0.81	-0.23	20.98	-24.45	16.83	13.06	-38.91	52.00	3.45	50.88	-27.17
b*	0.01	-0.04	0.60	0.73	0.19	0.49	-19.43	55.93	68.80	-49.49	30.77	30.01	81.29	-12.72	-29.46
Density	0.75	0.98	1.24	1.67	2.04	2.42									

D50 Illuminant, 2 degree observer

Density ⟶

Golden Thread

Colors by Munsell Color Services Lab

Don Williams



